CONTENT

Cesare Sposito, Francesca Scalisi (EDITORIAL)
Riflessioni e traiettorie sul contributo delle discipline dell'Architettura agli SDG 9 e 10 3
Reflections and trajectories on the contribution of architectural disciplines to SDGs 9 and 10

Elodie Nourrigat
Ibridazione della professione – Nuove alleanze per un'innovazione infrastrutturale del progetto architettonico 22
Hybridisation of the profession – New alliances for an infrastructural innovation of the architectural project

Andrea Tartaglia, Luigi Alini
Infrastrutture tra sostenibilità e necessità – Progettazione ambientale e approccio transcalare 36
Infrastructure between sustainability and necessity – Environmental design and a trans-scalar approach

Frida Pashako, Ditjon Baboçi
Scuole come infrastrutture urbane – Pianificazione, redistribuzione e rinnovo dell'infrastruttura scolastica a Tirana 50
Schools as urban infrastructures – Planning, redistribution, and renewal of school infrastructure in Tirana

Maria Luisa Germanà, Giorgia Madonia
Adattabilità e inclusione – Strategie contro le disuguaglianze 68
Adaptability and inclusion – Strategies to reduce inequality in the built environment

Francesca Moraci, Alessandra Barresi, Pietro Bova, Francesco Trimboli
Alfabetizzazione sul carbonio e infrastrutture ecosistemiche – Metodo GIS-R per la valutazione climatica 82
Carbon literacy and ecosystem infrastructures – A GIS-R method for climate assessment

Teresa Villani, Anna Mezzalana
Borghi come infrastrutture di cura – Metaprogetto per l'Alzheimer nelle aree interne 94
Borghi as care infrastructures – A metaproject for Alzheimer's disease in inland areas

Emma Barelles-Vicente, Maria E. Torner-Feltrer, Jaime Llinares Millán, Inmaculada Oliver-Faubel
Riuso adattivo come infrastruttura territoriale per le aree rurali – Valutazione con indicatori per il riuso a Moya 118
Adaptive reuse as territorial infrastructure for rural areas – Indicator-based evaluation of reuse in Moya

Thai Huyen Nguyen
Il patrimonio industriale ad Hanoi – Una valutazione multiscalare per il riuso adattivo di una innovativa infrastruttura urbana 134
Industrial heritage in Hanoi – A multi-scalar assessment for adaptive reuse and innovative urban infrastructure

Maria Pilar Vettori, Silvia Battaglia, Francesca Daprà, Andrea Dechamps
Infrastrutture di prossimità – Metodi e strategie per la rigenerazione dei comparti ferroviari della rete lombarda 150
Infrastructures for proximity – Methods and strategies for the regeneration of railway station areas in the Lombardy network

Danila Longo, Rossella Roversi, Riccardo Mercuri, Beatrice Turillazzi
Rifugi climatici come infrastrutture urbane adattive – Una rete sistemica per ridurre le disuguaglianze 172
Climate shelters as adaptive urban infrastructures – A systemic network to reduce inequalities

Cinzia Talamo, Noelia Huanca Coacalla, Nazly Atta, Giancarlo Paganin
Ecosistemi socio-circolari – Innovazione sociale, strategie circolari e ambiente costruito 192
Socio-circular ecosystems – Social innovation, circular strategies, and the built environment

Giuseppe Losco, Chiara Pasqualini, Mohammadjavad Khodaparast
Transizioni interconnesse per la sostenibilità industriale – Strumenti digitali, efficienza energetica e circolarità 212
Interconnected transitions for industrial sustainability – Digital tools, energy efficiency, and circularity

Spartaco Paris, Carlo Vannini
Parti reversibili dell'abitare – Atlante Digitale per la rigenerazione incrementale dell'Edilizia Residenziale Pubblica 228
Soft parts of living – Digital Atlas for the incremental regeneration of Public Residential Housing

Rosa Romano, Elisa Mazzoni
Biofilia e rigenerazione urbana – Soluzioni Tech-NbS stampate in 3D per microinterventi resilienti 246
Biophilia and urban regeneration – 3D-printed Tech-NbS for resilient micro-interventions

Ingrid M. Paoletti, Laura Elisabetta Malighetti, Francesco Pittau, Federica Pradella, Giorgio Castellano
Nature-based Retrofit System – Sistema prefabbricato a base biologica per il retrofit energetico degli edifici 262
Nature-based Retrofit System – Prefabricated bio-based system for the energy retrofit of buildings

Ingrid M. Paoletti, Giuseppe Conti, Giorgio Castellano, Federica Pradella
Trasferimento tecnologico automotive-AEC – Framework DfMA e sistemi di facciata complessi 278
Automotive-AEC technology transfer – DfMA framework and complex façade systems

Ayşenur Babacan Demirel, Candan Çınar Çıtak
Passaporti dell'edificio e dei materiali come infrastrutture socio-tecniche per l'economia circolare e l'equità 294
Building and material passports as socio-technical infrastructures for the circular economy and equity

Dario Russo
Aesthetic Design e filosofia pratica – Estetica ed etica nel progetto contemporaneo 310
Aesthetic Design and practical philosophy – Aesthetics and ethics in contemporary design

Paolo Tamborrini, Dario Russo, Cristina Marino
Il design come infrastruttura relazionale – Università, territori e trasformazioni sistemiche 332
Design as relational infrastructure – Universities, territories, and systemic transformations

Marita Canina, Tatiana Efremenko
Co-creare futuri sostenibili – Il MUSAE Factory model per un'innovazione con arte e tecnologia orientata agli SDG 346
Co-creating sustainable futures – The MUSAE Factory Model for SDG-oriented innovation through art and technology

Lucia Pietroni, Daniele Galloppo, Vittorio Giannetti, Caterina Di Flamminio
Innovazione digitale e circolarità nel settore legno-arredo – Strategie sostenibili per il Made in Italy 368
Digital innovation and circularity in the wood-furniture sector – Sustainable strategies for Made in Italy

Matteo O. Ingaramo, Eugenia C. C. Chiara, André Leme Fleury, C. Harris Stamatopoulos
Design e ricerca attiva per gli SDG – Ecosistemi di innovazione sostenibile 382
Design and active research for SDGs – Ecosystems of sustainable innovation

Emanuela Bonini Lessing, Alessandra Bosco, Mario Ciaramitaro, Goran Pavlov
Design per il turismo rigenerativo – Musei, alleanze territoriali e rafforzamento delle competenze 400
Design for regenerative tourism – Museums, territorial alliances, and capacity building

Camilo Ayala-Garcia, Noa Ruth Paul, Laura Bordini, Mila Stepanovic, Nitzan Cohen
Valorizzazione di materiali residui nelle filiere produttive agro-industriali – Transizioni circolari in Alto Adige (Italia) 416
Valorisation of residual materials in agro-industrial production chains – Circular transitions in South Tyrol (Italy)

Camilo Ayala-Garcia, Carolina Perez Rodriguez, Clara Forero Lesmes, Tatiana Cruz Perea et Alii
Anacardo circolare – Progetto centrato sulle persone per filiere circolari di produzione dell'anacardio 432
Cashew in-cycle – Human-centred design for circular cashew production chains

Rewat Suksikarn
Progettare con lo yan-lipao per l'innovazione nell'Industria 5.0 450
Designing with yan-lipao for innovation in Industry 5.0

Alessandra Rinaldi, Jonathan Lagrimino
Biciclette e cargo bike – Modelli ibridi modulari per micromobilità urbana e logistica 464
Bicycles and cargo bikes – Hybrid modular models for urban micromobility and logistics

Federico Orfeo Oppedisano, Daniele Rossi, Manuel Scortichini
Apprendimento immersivo per aule resilienti – Infrastruttura digitale per arredi salvavita 482
Immersive learning for resilient classrooms – Digital infrastructure for life-saving furniture

Gianpiero Alfarano, Alessandro Spennato, Jurji Filieri
Superfici come infrastrutture – Design e manifattura additiva nell'Industria 5.0 498
Surfaces as infrastructure – Design and additive manufacturing in Industry 5.0

Mario Ivan Zignego, Alessandro Bertirotti, Paolo Gemelli, Laura Pagani
Monitoraggio dello stato umano nella formazione marittima – Il caso On Watch 516
Human state monitoring in maritime training – The On Watch case

ISSN print 2464-9309
ISSN online 2532-683X



LetteraVentidue

19

International Journal of Architecture Art and Design

19 | 2026

AGATHÓN

SDGs 9, 10 | PROGETTI, RICERCHE, SINERGIE, COMPROMESSI | PROJECTS, RESEARCH, SYNERGIES, TRADE-OFFS

INDUSTRIA, INNOVAZIONE, INFRASTRUTTURE (SDG 9) E RIDURRE LE DISUGUAGLIANZE (SDG 10)

PROGETTI, RICERCHE, SINERGIE, COMPROMESSI

INDUSTRY, INNOVATION, INFRASTRUCTURE (SDG 9), AND REDUCE INEQUALITIES (SDG 10)

PROJECTS, RESEARCH, SYNERGIES, TRADE-OFFS

AGATHÓN

19
2026

AGATHÓN
International Journal
of Architecture, Art and Design

ISSN print: 2464-9309 – ISSN online: 2532-683X

AGATHÓN is indexed on

Scientific Director
Cesare Sposito (University of Palermo, Italy)

Managing Director
Micaela Maria Sposito

International Scientific Committee
Alfonso Acocella (University of Ferrara, Italy), **Jose Ballesteros** (Polytechnic University of Madrid, Spain), **Salvatore Barba** (University of Salerno, Italy), **Cristina Bianchetti** (Polytechnic University of Torino, Italy), **Françoise Blanc** (Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Toulouse, France), **Roberto Bologna** (University of Firenze, Italy), **Tarek Brik** (University of Tunis, Tunisia), **Tor Broström** (Uppsala University, Sweden), **Josep Burch i Rius** (University of Girona, Spain), **Maurizio Carta** (University of Palermo, Italy), **Alicia Castillo Mena** (Complutense University of Madrid, Spain), **Pilar Chias Navarro** (Universidad de Alcalà, Spain), **Jorge Cruz Pinto** (University of Lisbon, Portugal), **Maria Antonietta Esposito** (University of Firenze, Italy), **Emilio Faroldi** (Polytechnic University of Milano, Italy), **Francesca Fatta** ('Mediterranea' University of Reggio Calabria, Italy), **Francisco Javier Gallego Roca** (University of Granada, Spain), **Javier García-Gutiérrez Mosteiro** (Polytechnic University of Madrid, Spain), **Maria Luisa Germanà** (University of Palermo, Italy), **Vicente Guallart** (IAAC – Institute for Advanced Architecture of Catalonia, Spain), **Motomi Kawakami** (Tama Art University, Japan), **Fakher Kharrat** (Ecole Nationale d'Architecture et d'Urbanisme, Tunis), **Walter Klasz** (University of Art and Design Linz, Austria), **Paolo La Greca** (University of Catania, Italy), **Inhee Lee** (Pusan National University, South Corea), **Mario Losasso** ('Federico II' University of Napoli, Italy), **Maria Teresa Lucarelli** ('Mediterranea' University of Reggio Calabria, Italy), **Cristiana Mazzoni** (Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Paris-Belleville, France), **Renato Teofilo Giuseppe Morganti** (University of L'Aquila, Italy), **Stefano Francesco Musso** (University of Genova, Italy), **Olimpia Niglio** (University of Pavia, Italy), **Marco Rosario Nobile** (University of Palermo, Italy), **Patrizia Ranzo** ('Luigi Vanvitelli' University of Napoli, Italy), **Laura Ricci** ('Sapienza' University of Roma, Italy), **Mosè Ricci** (University of Trento, Italy), **Andrea Rolando** (Polytechnic University of Milano, Italy), **Dominique Rouillard** (National School of Architecture Paris Malaquais, France), **Roberto Pietroforte** (Worcester Polytechnic Institute, USA), **Carmine Piscopo** ('Federico II' University of Napoli, Italy), **Luigi Sansone** (Art Reviewer, Milano, Italy), **Andrea Sciascia** (University of Palermo, Italy), **Federico Soriano Pelaez** (Polytechnic University of Madrid, Spain), **Benedetta Spadolini** (University of Genova, Italy), **Conrad Thake** (University of Malta), **Maria Chiara Torricelli** (University of Firenze, Italy), **Fabrizio Tucci** ('Sapienza' University of Roma, Italy)

Editor-in-Chief
Francesca Scalisi (University of Palermo, Italy)

Editorial Board
Tiziano Aglieri Rinella (IUAV, Italy), **Fabrizio Aimar** (Texas A&M University, USA), **Silvia Barbero** (Polytechnic University of Torino, Italy), **Carmelina Bevilacqua** ('Sapienza' University of Roma, Italy), **Mario Bisson** (Polytechnic University of Milano, Italy), **Luca Bullaro** (Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia), **Tiziana Campisi** (University of Palermo, Italy), **Nicola Valentino Canessa** (University of Genova, Italy), **Chiara Catalano** (National Centre of Research – IRET, Italy), **Giuseppe Di Benedetto** (University of Palermo, Italy), **Santina Di Salvo** (University of Palermo, Italy), **Ana Esteban-Maluenda** (Polytechnic Univeristy of Madrid, Spain), **Raffaella Fagnoni** (IUAV, Italy), **Antonella Falzetti** ('Tor Vergata' University of Roma, Italy), **Elisa Mariarosaria Farella** (Bruno Kessler Foundation, Italy), **Rubén García Rubio** (Tulane University, USA), **Toufic Haidamous** (American University in the Emirates, UAE), **Pilar Cristina Izquierdo Gracia** (Polytechnic Univeristy of Madrid, Spain), **Daniel Ibañez** (IAAC – Institute for Advanced Architecture of Catalonia, Spain), **Pedro António Janeiro** (University of Lisbon, Portugal), **Massimo Lauria** ('Mediterranea' University of Reggio Calabria, Italy), **Ina Macaione** (University of Basilicata, Italy), **Francesco Maggio** (University of Palermo, Italy), **Fernando Moral-Andrés** (Universidad Nebrija in Madrid, Spain), **Nuria Nebot Gómez de Salazar** (University of Malaga, Spain), **David Ness** (University of South Australia, Australia), **Elodie Nourrigat** (Ecole Nationale Supérieure d'Architecture Montpellier, France), **Elisabetta Palumbo** (University of Bergamo, Italy), **Frida Pashako** (Metropolitan University of Tirana, Albania), **Julio Cesar Perez Hernandez** (University of Notre Dame du Lac, USA), **Valerio Perna** (Epoka University, Albania), **Pier Paolo Peruccio** (Polytechnic University of Torino, Italy), **Rosa Romano** (University of Firenze, Italy), **Daniele Ronsivalle** (University of Palermo, Italy), **Monica Rossi-Schwarzenbeck** (Leipzig University of Applied Sciences, Germany), **Dario Russo** (University of Palermo, Italy), **Michele Russo** ('Sapienza' University of Roma, Italy), **Clice de Toledo Sanjar Mazzilli** (University of São Paulo, Brazil), **Jörg Schröder** (Leibniz University Hannover, Germany), **Marichela Sepe** ('Sapienza' University of Roma, Italy), **Marco Sosa** (Zayed University, UAE), **Zeila Tesoriere** (University of Palermo, Italy), **Antonella Trombadore** (World Renewable Energy Network, UK), **Alessandro Valenti** (University of Genova, Italy), **Gaspare Massimo Ventimiglia** (University of Palermo, Italy), **Antonella Violano** ('Luigi Vanvitelli' University of Campania, Italy), **Alessandra Zanelli** (Polytechnic University of Milano, Italy)

Assistant Editors
Maria Azzalin ('Mediterranea' University of Reggio Calabria, Italy), **Giorgia Tucci** (University of Genova, Italy)

Graphic Designer
Michele Boscarino

Web Editor
Pietro Artale

Publisher

LetteraVentidue Edizioni S.r.l.
Via Luigi Spagna, 50 P | 96100 Siracusa (IT)
P.IVA 01583340896
https://letteraventidue.com

Il vol. 19 è stato stampato nel giugno 2026 da
Issue 19 was printed in June 2026 by
The Factory S.r.l.
via Triburtina n. 912 | 00156 Roma (IT)

AGATHÓN è un marchio di proprietà di Cesare Sposito
AGATHÓN is a trademark owned by Cesare Sposito

Le immagini pubblicate nella rivista rispondono alla pratica del Copyright Act 17 U.S.C. 107 recepita in Italia dall'art. 70 della Legge sul Diritto d'Autore che ne consente l'uso a fini di critica, insegnamento e ricerca scientifica a scopi non commerciali.
The images published in the journal comply with the Copyright Act 17 U.S.C. 107, which allows their use for criticism, teaching and scientific research for non-commercial purposes.

Il Journal è stampato con il contributo degli Autori che mantengono i diritti sull'opera originale senza restrizioni.
The Journal is published with fund of the Authors whom retain all rights to the original work without any restrictions.

AGATHÓN adotta il sistema di revisione del double-blind peer review. I saggi nella sezione 'Focus' non sono soggetti al suddetto processo di revisione in quanto a firma di Autori invitati dalla Direzione nella qualità di esperti sul tema.
The AGATHÓN Journal adopts a double-blind peer review. The essays on 'Focus' section are not subjected to double-blind peer review process because the Authors are invited by the Directorate as renowned experts in the subject.

AGATHÓN | International Journal of Architecture Art and Design
Issues for year: 2 | ISSN print: 2464-9309 | ISSN online: 2532-683X

Registrazione n. 12/2017 del 13/07/2017 presso la Cancelleria del Tribunale di Palermo
Registration number 12/2017 dated 13/07/2017, registered at the Palermo Court Registry

Editorial Office
Via Luigi Spagna, 50 P | 96100 Siracusa (IT) | E-mail: agathon@letteraventidue.com – segreteria@agathon.it

AGATHÓN è stata inclusa nella lista ANVUR delle riviste di classe A per l'area 08 a partire dal volume 1 del 2017 ed è indicizzata in SCOPUS e in SCIMAGO dal 2023.
AGATHÓN has been included in the Italian ANVUR list of Class A Journals for area 08 starting from volume no. 1, June 2017, and is indexed in SCOPUS and SCIMAGO since 2023.

Per le attività svolte nel 2025 relative al double-blind peer review process, si ringraziano i seguenti Revisori:

As concern the double-blind peer review process done in 2025 we would thanks the following Referees:

Giuseppe Abbate (University of Palermo), **Raffaele Amore** ('Federico II' University of Napoli), **Emanuele Walter Angelico** (University of Palermo), **Laura Anselmi** (Polytechnic University of Milano), **Ernesto Antonini** (University of Bologna), **Venanzio Arquilla** (Polytechnic University of Milano), **Serena Baiani** ('Sapienza' University of Roma), **Ginevra Balletto** (University of Cagliari), **Adolfo F. L. Baratta** (University of 'Roma Tre'), **Luca Barbarossa** (University of Catania), **Michela Barosio** (Polytechnic University of Torino), **Riccardo Butini** (University of Firenze), **Daniela Calabi** (Polytechnic University of Milano), **Andrea Campioli** (Polytechnic University of Milano), **Eliana Cangelli** ('Sapienza' University of Roma), **Maria Rita Canina** (Polytechnic University of Milano), **Renato Capozzi** ('Federico II' University of Napoli), **Carola Clemente** ('Sapienza' University of Roma), **Giovanni Battista Cocco** (University of Cagliari), **Giovanni Conti** (Polytechnic University of Milano), **Emanuela Coppola** ('Federico II' University of Napoli), **Valeria D'Ambrosio** ('Federico II' University of Napoli), **Federica Dal Falco** ('Sapienza' University of Roma), **Paola De Joanna** ('Federico II' University of Napoli), **Barbara Del Curto** (Polytechnic University of Milano), **Chiara Del Gesso** ('Sapienza' University of Roma), **Salvatore Di Dio** (University of Palermo), **Edoardo Dotto** (University of Catania), **Franco Fassio** (University of Gastronomic Sciences of Pollenzo), **Emilia Garda** (Polytechnic University of Torino), **Claudio Germak** (Polytechnic University of Torino), **Andrea Giachetta** (University of Genova), **Matteo Ieva** (Polytechnic University of Bari), **Benedetto Inzerillo** (University of Palermo), **Matteo Ingaramo** (Polytechnic University of Milano), **Roberta Ingaramo** (Polytechnic University of Torino), **Carla Langella** ('Federico II' University of Napoli), **Luca Lanini** (University of Pisa), **Renzo Lecardane** (University of Palermo), **Giampiero Lombardini** (University of Genova), **Danila Longo** (University of Bologna), **Luciana Macaluso** (University of Palermo), **Vito Martelliano** (University of Catania), **Pasquale Mei** ('Federico II' University of Napoli), **Martino Milardi** ('Mediterranea' University of Reggio Calabria), **Luigi Mollo** ('Luigi Vanvitelli' University of Campania), **Elena Montacchini** (Polytechnic University of Torino), **Elena Mussinelli** (Polytechnic University of Milano), **Consuleo Nava** (University of Reggio Calabria), **Giorgio Peghin** (University of Cagliari), **Silvia Pericu** (University of Genova), **Adele Picone** ('Federico II' University of Napoli), **Claudio Piferi** (University of Firenze), **Riccardo Pollo** (Polytechnic University of Torino), **Manuela Raitano** ('Sapienza' University of Roma), **Marina Rigillo** ('Federico II' University of Napoli), **Marianna Rotilio** (University of L'Aquila), **Carmen Rotondi** ('Sapienza' University of Roma), **Sergio Russo Ermolli** ('Federico II' University of Napoli), **Marco Sala** (University of Firenze), **Paola Scala** ('Federico II' University of Napoli), **Filippo Schilleci** (University of Palermo), **Antonello Monsù Scolaro** (University of Sassari), **Roberta Spallone** (Polytechnic University of Torino), **Paolo Tamborrini** (Polytechnic University of Torino), **Andrea Tartaglia** (University of Catania), **Silvia Tedesco** (Polytechnic University of Torino), **Enza Tersigni** ('Federico II' University of Napoli), **Alberto Ulisse** ('Gabriele D'Annunzio' University of Chieti-Pescara), **Clara Verazzo** ('Gabriele D'Annunzio' University of Chieti-Pescara), **Teresa Villani** ('Sapienza' University of Roma), **Calogero Vinci** (University of Palermo).

19
2026
AGATHÓN
International Journal
of Architecture, Art and Design

ISSN print: 2464-9309 – ISSN online: 2532-683X

Riflessioni e traiettorie sul contributo delle discipline dell'Architettura agli SDG 9 e 10: Industria, Innovazione, Infrastrutture e Ridurre le Disuguaglianze

Reflections and trajectories on the contribution of architectural disciplines to SDGs 9 and 10: Industry, Innovation, Infrastructure, and Reduce Inequalities

Editoriale | Editorial

Cesare Sposito
Co-Scientific Director
Associate Professor in Technological and Environmental Design of Architecture
University of Palermo

Arch. Ph.D. Francesca Scalisi
Editor-in-Chief
Assistant Professor in Industrial Design
University of Palermo

pp. 3-21 | doi.org/10.69143/2464-9309/1902026

Il Volume 19 di AGATHÓN dà seguito al percorso avviato con i precedenti numeri dedicati all'Agenda 2030, concentrando l'attenzione su due Obiettivi di Sviluppo Sostenibile che agiscono come dispositivi strutturali della transizione: Industria, Innovazione, Infrastrutture (SDG 9) e Ridurre le disuguaglianze (SDG 10). I due temi fanno parte dei 17 Obiettivi di Sviluppo Sostenibile adottati nel settembre 2015 dagli Stati membri delle Nazioni Unite (UN, 2015) e promossi come appello a un'azione urgente capace di coniugare prosperità, sviluppo equo e protezione del Pianeta, valorizzando la cooperazione tra Paesi, Governi nazionali, Amministrazioni locali, Istituzioni pubbliche, imprese private, società civile e singoli individui. A pochi anni dalla scadenza fissata per il loro raggiungimento tale appello impone tuttavia alla comunità scientifica una riflessione non più differibile su dove siamo arrivati, su quali traiettorie stiamo procedendo e su quali margini di trasformazione siano ancora praticabili. Una valutazione dei progressi fondata su dati comparabili è stata proposta dal Global Sustainable Development Report (IGS, 2023) che ha richiamato la necessità di una correzione sostanziale e di un'accelerazione delle politiche attuative, senza le quali l'umanità dovrà affrontare periodi prolungati di crisi e incertezza, con il rischio di compromettere ulteriormente il principio di 'non lasciare indietro nessuno' e la salvaguardia degli ecosistemi. Se il Rapporto del 2019 registrava ancora avanzamenti differenziati ma in parte coerenti con le traiettorie previste, il quadro delineato dal Rapporto 2023 appare più critico: su alcuni Obiettivi non si è accelerato abbastanza, mentre su altri – sicurezza alimentare, azione per il clima e protezione della biodiversità – il mondo continua a muoversi in una direzione non compatibile con la sostenibilità.

In questo scenario diventa centrale comprendere che gli SDG non operano come ambiti separati; secondo quanto affermato dalle Nazioni Unite (UN, 2015) al momento della loro definizione e confermato dal Global Sustainable Development Report 2019 molti Obiettivi attivano relazioni di sinergia, in particolare quelli sociali e ambientali che incidono sul progresso complessivo dell'Agenda 2030. La letteratura scientifica sulle interconnessioni tra gli SDG mostra inoltre che esiste un potenziale ancora non pienamente utilizzato per conseguire avanzamenti simultanei attraverso pianificazione integrata e strategie coordinate. Allo stesso tempo ogni avanzamento può produrre compromessi: politiche agricole intensive, crescita economica non governata, sviluppo infrastrutturale privo di valutazioni ambientali e sociali o transizioni digitali non accessibili possono trasferire costi ecologici e sociali su territori e gruppi vulnerabili. Non è casuale che il Global Sustainable Development Report 2023 evidenzi come gli Obiettivi 14 e 15 siano spesso influenzati negativamente da progressi conseguiti in altri settori più che positivamente dalle azioni specifiche a essi dedicate (IGS, 2023).

La natura di tali connessioni varia in funzione dello spazio, del tempo, dei livelli di reddito e dei gruppi di popolazione coinvolti: la riduzione della povertà può generare effetti positivi complessivi nei Paesi a basso reddito, mentre nei Paesi ad alto reddito risultano decisive le strategie integrate capaci di affrontare simultaneamente cambiamento climatico e disuguaglianze; questi stessi Paesi sembrano tuttavia confrontarsi con un numero maggiore di compromessi, condizione che può contribuire a spiegare la lentezza del loro avanzamento verso gli SDG (Lusseau and Mancini, 2019; Kostetckaia and Hametner, 2022). A ciò si aggiunge il carattere transfrontaliero di molte interconnessioni: secondo l'OECD (2019, 2024), il 57% dei 169 target raggiungibili in un Paese può produrre ricadute in altre regioni del mondo attraverso flussi di capitali, beni, risorse umane e naturali. In tal senso generare impatti negativi altrove rappresenta un costo etico, ambientale ed economico; non riconoscere le possibili ricadute positive in contesti lontani significa invece perdere occasioni di riequilibrio e cooperazione. Tali condizioni rendono necessaria una comprensione sistemica delle sinergie e dei compromessi, utile sia per orientare la ricerca sia per definire strumenti capaci di ridurre le criticità, governare le incertezze e valorizzare le opportunità specifiche dei contesti. Sono oggi disponibili metodi per l'analisi integrata degli Obiettivi, il supporto alle decisioni e il monitoraggio dei progressi (Barquet et alii, 2022), inclusi strumenti di valutazione preliminare degli impatti promossi dalla Commissione Europea (European Commission, 2023). Ciò che appare ancora insufficiente è la capacità di tradurre questi apparati in pratiche di progetto, produzione, realizzazione, gestione e manutenzione capaci di misurare gli effetti delle politiche, dei piani, delle tecnologie e delle azioni nel tempo. Pensare in termini di sistemi significa quindi interrogare non solo l'efficacia puntuale delle soluzioni, ma anche le loro ricadute distributive, ambientali e istituzionali, prima e dopo la loro attuazione.

In questa prospettiva SDG 9 e SDG 10 costituiscono una coppia di Obiettivi critica. Il primo non riguarda soltanto industria, infrastrutture e innovazione in senso tecnico-produttivo ma la possibilità di costruire dispositivi materiali, digitali e organizzativi capaci di generare valore senza superare i limiti planetari; il secondo impone di verificare chi accede a tali benefici, chi ne sostiene i costi e quali gruppi o territori rischiano di rimanerne esclusi. Innovazione e infrastrutturazione, se non orientate da criteri di equità, possono rafforzare divari già esistenti tra centri e periferie, tra aree urbane e rurali, tra grandi imprese e piccole realtà produttive, tra comunità dotate di capacità istituzionale e contesti con minori risorse tecniche, finanziarie e cognitive. Al contrario se progettate come infrastrutture di accesso, cura, formazione, lavoro dignitoso e redistribuzione, possono diventare leve decisive per ridur-

19
2026
AGATHÓN
International Journal
of Architecture, Art and Design

ISSN print: 2464-9309 – ISSN online: 2532-683X

re vulnerabilità e disuguaglianze. L'ambiente costruito si colloca al centro di questa tensione: esso interagisce con ogni Obiettivo (Thorne and Duran, 2016) ma rappresenta anche una delle principali criticità contemporanee; consuma energia e risorse naturali, produce emissioni e rifiuti, influenza la salute, condiziona l'accesso a servizi, opportunità e spazi di qualità, e può amplificare o attenuare le disuguaglianze. Tale questione diventa particolarmente rilevante nelle città, la cui importanza in termini di vulnerabilità e di opportunità è implicita in tutti gli SDG, soprattutto considerando che entro il 2050 circa il 70% della popolazione mondiale vivrà in aree urbanizzate (UN-Habitat, 2022). Allo stesso tempo territori fragili, aree interne, Patrimoni dismessi, sistemi produttivi locali e filiere materiali mostrano che la transizione non può essere confinata alla città compatta o alla sola innovazione tecnologica ma deve attraversare tutte le scale del progetto, dal paesaggio alla materia.

Sulla scorta di tali riflessioni il Volume 19 di AGATHÓN raccoglie contributi di ricerca, sperimentazioni e riflessioni critiche riferibili alle aree del Paesaggio, dell'Urbanistica, della Composizione Architettonica e Urbana, dell'Ingegneria, della Progettazione Tecnologica e Ambientale dell'Architettura, del Design e del Recupero Edilizio con l'intento di alimentare un confronto aperto sul tema 'Industria, Innovazione, Infrastrutture (SDG 9), Ridurre le disuguaglianze (SDG 10) | Progetti, ricerche, sinergie e compromessi'. I contributi pubblicati assumono un'impostazione multidisciplinare e multiscalare, trattano aspetti di processo, metodologie e modelli di valutazione ex ante ed ex post, superamento di limiti, divari e barriere, valorizzazione delle sinergie e contenimento dei compromessi con gli altri Obiettivi. L'editoriale che segue intende restituire questa complessità attraverso una sequenza di scale: dalle infrastrutture teoriche, cognitive e relazionali dell'innovazione ai sistemi paesaggistici e territoriali, dalle città e dagli insediamenti all'edificio, dall'involucro alle filiere produttive, dagli oggetti alle interfacce fino alla superficie e alla materia. La finalità non è descrivere i contributi come casi isolati, ma riconoscere in essi strumenti trasferibili per accelerare l'attuazione dell'Agenda 2030, esplicitando le condizioni, i benefici e i compromessi che ogni azione progettuale comporta.

Un primo gruppo di contributi riguarda le infrastrutture teoriche, cognitive, relazionali, conoscitive e informative mediante le quali innovazione e riduzione delle disuguaglianze possono essere sviluppate, misurate e governate. In questa prospettiva il volume non assume l'SDG 9 come semplice richiamo a tecnologie, processi industriali o dotazioni materiali né l'SDG 10 come correttivo sociale aggiunto a posteriori, li considera piuttosto come campo unitario in cui metodi, dati, relazioni, esperienze e sistemi di valutazione definiscono le condizioni stesse dell'azione progettuale. Il contributo di Canina ed Efremenko (2026) apre questa traiettoria interpretando l'innovazione come processo anticipatorio e collaborativo, capace di confrontarsi con la complessità delle transizioni sostenibili e con i compromessi tra i diversi SDG. Il progetto MUSAE e il suo modello operativo propongono un impianto metodologico guidato dall'arte, orientato all'esplorazione dei futuri e coerente con il paradigma dell'Industria 5.0, in cui sperimentazione artistica, progetto, sviluppo tecnologico e co-creazione con l'intelligenza artificiale sono integrati in un percorso capace di produrre prototipi e scenari condivisi. La scala non è quella dell'oggetto o dell'edificio ma dell'ecosistema di innovazione in cui un sistema di attori, metodi e dispositivi opera tra ricerca, impresa, cultura e società. Il contributo collega l'SDG 9 alla costruzione di infrastrutture abilitanti per modelli produttivi più sostenibili, con sinergie esplicite rispetto a consumo e produzione responsabili, azione per il clima e tutela degli ecosistemi terrestri (SDG 12, 13 e 15); tale potenziale richiede però di governare il rischio che tecnologie avanzate e intelligenza artificiale rafforzino divari di accesso, capacità e controllo. In questa prospettiva le azioni concettuali, metodologiche, formative e sperimentali sviluppate dagli autori non si limitano a immaginare scenari futuri, ma rendono discutibili e negoziabili le tensioni della transizione fin dalle prime fasi del processo; proprio per questo la trasferibilità del metodo risiede nella sua applicabilità a contesti nei quali l'innovazione debba essere progettata prima ancora di essere attuata (European Commission, 2021).

Ingaramo et alii (2026) affrontano il problema della sua misurabilità proponendo un quadro metodologico per valutare il ruolo del design negli ecosistemi dell'innovazione a livello meso, fondato su ricerca attraverso il progetto, indicatori chiave di prestazione, analisi assistita dall'intelligenza artificiale e interviste a esperti. Lombardia, San Paolo e Stoccolma-Uppsala sono assunti come contesti comparativi per verificare in che misura il design sia presente negli ecosistemi, pur rimanendo spesso invisibile nei sistemi di misurazione; la scala è quella intermedia delle reti regionali di innovazione, dei partenariati tra Università e impresa, delle politiche e delle infrastrutture di competenze. Le sinergie indicate dagli autori coinvolgono, oltre all'SDG 9, i partenariati per gli Obiettivi, l'istruzione di qualità e il lavoro dignitoso (SDG 17, 4 e 8), poiché rendere misurabile il contributo del design significa orientare risorse, alleanze, formazione e trasferimento della conoscenza. Il compromesso è tuttavia rilevante: ogni metrica può rendere leggibili alcuni fenomeni e oscurarne altri, soprattutto quando conoscenza tacita, relazioni informali e capacità locali vengono tradotte in indicatori surrogati. In questa prospettiva le azioni valutative, metodologiche e di indirizzo politico messe in campo dagli autori definiscono una struttura comparativa adattabile ad altri ecosistemi, la cui trasferibilità dipende dalla capacità di usare gli indicatori come strumenti di interpretazione e non come dispositivi riduttivi di classificazione (Galindo-Rueda and Millot, 2015).

Il passaggio dalla misurazione alla relazione è sviluppato da Tamborrini, Russo e Marino (2026), che leggono il design come infrastruttura relazionale fra Università, territori e sistemi produttivi. L'analisi delle due edizioni di Design&Territori consente agli autori di osservare la trasformazione delle pratiche progettuali universitarie centrate sul prodotto e sui processi orientati a servizi, reti, capacità locali e continuità cognitiva. La scala è territoriale e formativa ma non coincide con un perimetro geografico stabile, perché riguarda l'insieme delle relazioni mediante cui il progetto produce apprendimento, fiducia, interpretazione del contesto e responsabilità condivisa. Il contributo collega direttamente gli SDG 9 e 10, mostrando che l'innovazione territoriale non può essere valutata soltanto in base a do-

19
2026
AGATHÓN
International Journal
of Architecture, Art and Design

ISSN print: 2464-9309 – ISSN online: 2532-683X

tazioni tecnologiche o produttive ma deve prendere in esame la capacità di costruire legami durevoli tra conoscenza, comunità e sistemi economici. Il compromesso riguarda la continuità di tali relazioni: senza tempo, riconoscimento istituzionale e responsabilità reciproca, la collaborazione tra Università e territori rischia di restare episodica. Le azioni concettuali, formative, istituzionali e di terza missione assumono dunque valore trasferibile quando il design opera come pratica di mediazione capace di rendere visibili relazioni latenti e di trasformarle in capacità operative (Manzini, 2015).

Il contributo di Russo (2026) sposta questa riflessione sulla struttura dell'esperienza progettata, sostenendo che nel design contemporaneo estetica ed etica non siano domini separati ma dimensioni immanenti della stessa configurazione. Il saggio attraversa scale diverse – prodotto, servizio, interfaccia digitale, spazio abitabile – per mostrare che il progetto organizza accessi, pratiche, comportamenti e possibilità d'uso. Le sinergie dichiarate riguardano salute e benessere, infrastrutture e innovazione, riduzione delle disuguaglianze e consumo responsabile (SDG 3, 9, 10 e 12) poiché ogni scelta formale, percettiva o funzionale può facilitare, orientare o impedire determinati comportamenti. Il compromesso più significativo è interno alla stessa idea di facilitazione: un'esperienza fluida può migliorare accessibilità e benessere ma può anche occultare relazioni di potere, esclusioni o automatismi non dichiarati. In questa prospettiva le azioni concettuali e valutative proposte dall'autore, fondate su categorie come ipo-estetica, iper-estetica e facilitazione, rendono trasferibile l'analisi estetica come strumento di responsabilità progettuale non come giudizio accessorio sulla forma (Dorfles, 1972).

Il gruppo di contributi teorico-metodologici chiude con Demirel e Çıtak (2026) che riconducono la questione dell'innovazione alla costruzione di infrastrutture informative per l'ambiente costruito. La revisione sistematica dedicata ai passaporti dell'edificio, ai passaporti dei materiali e ai registri digitali dell'edificio mostra che tali strumenti non possono essere interpretati come semplici archivi tecnici perché definiscono chi accede alle informazioni, chi controlla i dati, come vengono distribuiti costi e benefici lungo il ciclo di vita e quali capacità istituzionali sono necessarie per attuarli. La rilevanza rispetto agli SDG 9 e 10 è diretta mentre le sinergie con città sostenibili e consumo responsabile (SDG 11 e 12) derivano dalla possibilità di rendere più trasparenti riuso, manutenzione, circolarità e gestione del Patrimonio. Il compromesso è altrettanto netto: senza alfabetizzazione digitale, regole di accesso e capacità amministrativa i passaporti rischiano di rafforzare il divario tra soggetti in grado di usare i dati e soggetti che ne subiscono soltanto le conseguenze. Le azioni socio-tecniche individuate dagli autori – tracciabilità, interoperabilità, assetti di governo e supporto alle decisioni – rendono trasferibile una matrice analitica dell'equità distributiva, procedurale e infrastrutturale, utile a valutare dati e strumenti digitali come componenti di una più ampia politica della circolarità (Buchholz and Lützkendorf, 2023).

Un secondo gruppo di contributi indaga la scala paesaggistica, territoriale ed ecosistemica, dove il rapporto tra SDG 9 e 10 assume una dimensione spaziale esplicita. In questa prospettiva 'infrastrutturare' non significa soltanto costruire opere o introdurre tecnologie ma rendere leggibili relazioni tra suolo, ecosistemi, Patrimonio, economie locali, comunità e capacità di governo. È a questa scala che i benefici dell'innovazione possono diventare strumenti di riequilibrio oppure, se non governati, ampliare il divario tra territori attrattivi e territori marginali, tra comunità dotate di risorse decisionali e contesti privi di adeguati strumenti conoscitivi. Il contributo di Moraci et alii (2026) apre questa indagine interpretando il carbonio non solo come indicatore climatico ma come infrastruttura cognitiva per la pianificazione responsiva al clima. La procedura GIS-R applicata al bacino della Fiumara Calopinace traduce la classificazione ecosistemica di Carta Natura in categorie compatibili con i riferimenti dell'IPCC, consentendo di stimare stock di carbonio e potenziale di assorbimento e di confrontare stato ecosistemico attuale, quadro urbanistico vigente e scenari di trasformazione. La rilevanza per l'SDG 9 riguarda la costruzione di strumenti aperti, replicabili e scientificamente verificabili a supporto delle decisioni, mentre le sinergie con città e comunità sostenibili, azione per il clima e vita sulla terra (SDG 11, 13 e 15) derivano dalla possibilità di collegare servizi ecosistemici, usi del suolo e vulnerabilità climatica. Il compromesso riguarda la riduzione della complessità ecosistemica a metriche gestibili, necessaria per orientare le decisioni ma sempre esposta al rischio di semplificare relazioni biofisiche, sociali e temporali. In questa prospettiva l'azione conoscitiva, valutativa e pianificatoria degli autori rende trasferibile un flusso operativo adattabile ad altri contesti mediterranei caratterizzati da fragilità ecologica e pressione insediativa, offrendo una base utile per valutazioni ex ante ed ex post.

Barelles-Vicente et alii (2026) spostano l'attenzione sui contesti rurali marginali e sul modo in cui il Patrimonio costruito possa diventare infrastruttura territoriale. Il caso dell'ex Chiesa della Trinidad nel borgo fortificato di Moya (Spagna) consente agli autori di verificare il riuso adattivo come dispositivo capace di attivare flussi, servizi, governance e continuità d'uso. La scala è insediativa e territoriale: il singolo manufatto ricostruito viene valutato in base alla sua capacità di incidere su un sistema rurale segnato dallo spopolamento, da un accesso ridotto ai servizi e da fragilità economica. Il legame con gli SDG 9 e 10 è diretto perché il riuso può sostenere infrastrutturazione leggera, economie locali e riduzione delle disuguaglianze territoriali solo quando supera la logica della conservazione isolata e diventa parte di una rete di gestione stabile. Il compromesso, riconosciuto dagli autori, riguarda la dipendenza da dati disponibili, continuità istituzionale e verifica longitudinale, senza le quali il riuso rischia di restare episodio puntuale più che leva di sviluppo duraturo. Le azioni progettuali, gestionali e valutative confluiscono quindi in un quadro a quattro dimensioni, fondato su indicatori relativi ad attivazione sociale, flussi di visitatori, stabilità della governance e strategia d'intervento, la cui trasferibilità risiede nella possibilità di applicare la valutazione ex post ad altri insediamenti rurali soggetti a declino demografico (Augustiniok et alii, 2025). Il passaggio dal Patrimonio rurale agli ecosistemi culturali e turistici è affrontato da Bonini Lessing et alii (2026), che collocano musei e Istituzioni culturali al cen-

19
2026
AGATHÓN
International Journal
of Architecture, Art and Design

ISSN print: 2464-9309 – ISSN online: 2532-683X

tro di strategie per il turismo rigenerativo nei territori mediterranei. Nell'ambito del progetto Med4Regen il turismo è inteso come sistema di relazioni da trasformare, in cui visitatori, residenti, Centri culturali, associazioni e Amministrazioni possono costruire nuove forme di valore ambientale, sociale ed economico. Il contributo collega l'SDG 9 all'innovazione organizzativa e culturale e l'SDG 10 alla redistribuzione dei benefici tra comunità residenti e visitatori; le sinergie con città sostenibili e consumo responsabile (SDG 11 e 12) emergono nella proposta di superare la monocultura turistica, rafforzando presidi culturali e reti locali. Il compromesso riguarda il rischio che pratiche rigenerative vengano assorbite dalle stesse dinamiche estrattive che intendono contrastare, se non sono sostenute da governance, continuità istituzionale e capacità critica degli attori locali. La scala territoriale e urbana del metodo, particolarmente rilevante nei contesti sottoposti a forte pressione turistica, si traduce in azioni partecipative, formative e progettuali (analisi dei contesti, rafforzamento delle competenze, co-diagnosi, co-progettazione e azioni pilota) la cui trasferibilità dipende dall'adattabilità del quadro iperlocale a territori diversi, più che dalla replica delle singole soluzioni (Bellato and Pollock, 2025).

Dalla scala paesaggistica e territoriale il ragionamento si concentra quindi sui sistemi insediativi e urbani, dove infrastrutture, servizi e spazi collettivi diventano dispositivi di redistribuzione. In questa soglia intermedia, tra territorio e città, l'innovazione non coincide con l'aggiunta di nuove dotazioni ma con la capacità di riordinare reti esistenti, Patrimoni sottoutilizzati e sistemi di prossimità in modo da ridurre divari di accesso, fragilità sociali e vulnerabilità climatiche. Il contributo di Villani e Mezzalana (2026) interpreta i borghi in via di spopolamento come possibili infrastrutture di cura per persone con Alzheimer nelle fasi iniziali, mettendo in relazione rigenerazione del Patrimonio, assistenza di prossimità e welfare territoriale. L'interesse per gli SDG è evidente: salute e benessere, riduzione delle disuguaglianze, città e comunità sostenibili e azione per il clima (SDG 3, 10, 11 e 13) convergono nella possibilità di trasformare aree interne marginalizzate in contesti attivi di sperimentazione sociale. Il compromesso riguarda la sostenibilità gestionale di tale trasformazione poiché senza adeguati assetti istituzionali e risorse operative il riuso del Patrimonio rischia di produrre modelli fragili, difficili da sostenere oltre la fase sperimentale. Le azioni analitiche, metaprogettuali, assistenziali e gestionali, fondate sul confronto con modelli residenziali innovativi per la demenza e tradotte in criteri applicabili al Borgo di Cicignano, rendono trasferibile il metodo a condizione che qualità spaziale, servizi, presìdi sanitari, attori locali e continuità di gestione siano considerati congiuntamente (Ricci, Battisti and Monardo, 2014).

Dalla cura diffusa nei piccoli insediamenti il volume passa alla rete delle infrastrutture di mobilità, con il contributo di Vettori et alii (2026) dedicato alla rigenerazione dei comparti ferroviari lombardi. La 'stazione' non è letta come semplice nodo di transito ma come infrastruttura territoriale di prossimità, capace di connettere mobilità pubblica, spazio aperto, servizi, intermodalità e coesione sociale. L'indagine degli autori è multiscalare per natura: regionale nella lettura della rete, urbana nel rapporto tra stazione e quartiere, architettonica nella valutazione dei manufatti e degli spazi sottoutilizzati. Il contributo agisce in modo diretto sugli SDG 9, 10, 11 e 13 perché rende l'infrastruttura ferroviaria un supporto alla mobilità sostenibile e al tempo stesso un dispositivo di equità territoriale. Il compromesso riguarda la difficoltà di conciliare efficienza infrastrutturale, tutela del Patrimonio, sicurezza, modernizzazione funzionale e qualità dello spazio pubblico; proprio per questo le azioni conoscitive, valutative e programmatiche sviluppate dagli autori, attraverso uno strumento multicriteriale applicato al sistema delle stazioni lombarde e verificato nel caso di Milano Cadorna, rendono trasferibile una struttura modulare adattabile ad altre reti ferroviarie caratterizzate da Patrimoni diffusi, differenti condizioni di gestione e necessità di priorità d'intervento (Bruno et alii, 2024).

Nel contributo di Nguyen (2026) la città è osservata attraverso il Patrimonio industriale di Hanoi, dove la rapida urbanizzazione asiatica produce una condizione paradossale: la città entra in una fase post-industriale mentre l'industrializzazione è ancora in corso. I siti produttivi dismessi o in rilocalizzazione non sono quindi soltanto tracce del passato ma infrastrutture urbane potenziali, capaci di accogliere nuovi usi culturali, produttivi, sociali e ambientali. Il contributo intercetta gli SDG 8, 9, 11 e 17 collegando infrastrutture e innovazione, lavoro, città sostenibili e partenariati con un compromesso evidente: la rigenerazione può generare occupazione, servizi e identità urbana ma può anche alimentare sostituzioni immobiliari e perdita di memoria se non è sostenuta da strumenti pubblici, partecipazione e riconoscimento culturale. La scala dello studio attraversa il manufatto industriale, il quartiere, la città e gli assetti di governo urbano; in questo quadro l'azione conoscitiva, comparativa e decisionale degli autori, fondata su un corpus di siti industriali locali, questionari e casi studio internazionali, rende trasferibile uno Strumento di Valutazione Strategica non come applicazione di modelli europei ad Hanoi ma come costruzione di criteri capaci di riconoscere il valore del Patrimonio industriale di periodi storici diversi (UNESCO, 2023).

Pashako e Baboçi (2026) riportano il tema dell'infrastruttura urbana alla rete delle scuole di Tirana (Albania), assunte come dispositivi civici che incidono sulla forma della città, sulla distribuzione delle opportunità e sulla qualità dello spazio pubblico. La scala è urbana e di quartiere: il singolo edificio scolastico viene letto in rapporto a mobilità, accessibilità, spazi aperti, bacini d'utenza e processi di crescita metropolitana. Il contributo attiva sinergie tra istruzione di qualità, infrastrutture, riduzione delle disuguaglianze e città sostenibili (SDG 4, 9, 10 e 11), spostando il tema della scuola dal solo adeguamento edilizio alla costruzione di prossimità urbana. Il compromesso riguarda la possibilità che grandi programmi edilizi migliorino la dotazione quantitativa senza incidere realmente sull'accessibilità, sulla continuità degli spazi pubblici e sull'uso collettivo dei servizi. Le azioni critico-interpretative e cartografiche, basate sulla lettura degli strumenti di Piano, sull'analisi di tre casi studio e sulla cartografia dell'accessibilità, rendono trasferibile l'uso della scuola come indicatore di giustizia spaziale nei contesti metropolitani segnati da crescita rapida e distribuzione incompleta dei servizi (Amin, 2014). La questione urbana assume una declinazione climatica nel contributo di Longo et alii (2026) che in-

19
2026
AGATHÓN
International Journal
of Architecture, Art and Design

ISSN print: 2464-9309 – ISSN online: 2532-683X

terpreta i rifugi climatici come infrastrutture adattive permanenti per ridurre le disuguaglianze. Il punto di partenza è il riconoscimento che le ondate di calore non colpiscono tutti allo stesso modo: anziani, persone con ridotta mobilità, gruppi economicamente fragili e popolazioni isolate subiscono in modo più grave gli effetti dell'aumento delle temperature. Le sinergie riguardano salute e benessere, riduzione delle disuguaglianze, città sostenibili e azione per il clima (SDG 3, 10, 11 e 13) mentre il compromesso consiste nel rischio di costruire mappe e dotazioni climatiche senza una reale capacità di manutenzione, inclusione e attivazione sociale. Le azioni analitiche, progettuali, digitali e partecipative, sviluppate attraverso revisione critica della letteratura, confronto con casi internazionali e sperimentazioni a Bologna, rendono trasferibile il passaggio da interventi emergenziali a reti permanenti di comfort ambientale, capaci di orientare politiche urbane e priorità d'investimento solo se il rifugio climatico diventa servizio riconoscibile, accessibile e stabile nel tempo (IPCC, 2023).

Il gruppo dei contributi che indaga alla scala urbana si chiude con il contributo di Talamo et alii (2026) sul concetto di Ecosistema Socio-Circolare per leggere l'economia circolare non solo come ottimizzazione di materiali e rifiuti ma come sistema spaziale e relazionale fondato sulla condivisione di risorse tangibili e intangibili. La scala è meso e macro: quartieri, distretti, reti urbane e sistemi di attori nei quali conoscenza, spazi, servizi, materiali, energia e acqua vengono cogestiti secondo configurazioni diverse. La rilevanza per gli SDG 9 e 10 risiede nella possibilità di trasformare la circolarità in infrastruttura sociale, capace di generare valore, inclusione e nuove forme dell'abitare; le sinergie con città sostenibili e consumo responsabile (SDG 11 e 12) emergono dalla messa in relazione tra configurazioni spaziali, assetti di gestione e accessibilità alle risorse; il compromesso riguarda la distribuzione del potere decisionale nei sistemi di condivisione, poiché una risorsa condivisa non è automaticamente equa se non sono chiari diritti di accesso, responsabilità, costi e benefici. Le azioni concettuali, analitiche e progettuali sviluppate dagli autori, applicate a casi europei per riconoscere modelli aperti, ibridi o chiusi di condivisione delle risorse, rendono trasferibili categorie utili a leggere esperienze differenti senza ridurle a un unico modello (Khadim et alii, 2022).

Dal sistema urbano la lente del volume si sposta a quello dell'edificio e dell'abitare, dove le disuguaglianze non si manifestano soltanto come distanza dai servizi o diversa esposizione ai rischi ambientali ma soprattutto come rigidità degli spazi, povertà di prestazioni, difficoltà di accesso, scarsa capacità di trasformazione e fragilità gestionale. A questa scala il rapporto tra innovazione e inclusione diventa particolarmente concreto: un edificio può accogliere pratiche d'uso diverse, adattarsi nel tempo e ridurre condizioni di esclusione oppure, al contrario, consolidare vincoli fisici e organizzativi che rendono più difficile abitare, curare, manutenere e condividere. Germanà e Madonia (2026) affrontano questo nodo assumendo adattabilità e inclusione come dimensioni reciprocamente costitutive del progetto dell'ambiente costruito. Il contributo si colloca nell'ambito della Progettazione Tecnologica e Ambientale dell'Architettura e interpreta le disuguaglianze spaziali come manifestazioni tangibili di processi sociali, economici e culturali più ampi. Le sinergie dichiarate riguardano povertà, riduzione delle disuguaglianze, città sostenibili e consumo responsabile (SDG 1, 10, 11 e 12), mentre il rapporto con l'SDG 9 emerge nella centralità attribuita alla cultura tecnologica dell'ambiente costruito come strumento per ridurre barriere materiali. Il compromesso riguarda il rischio che la flessibilità spaziale, se non sostenuta da accessibilità economica, regole di gestione e partecipazione, trasferisca sugli abitanti la responsabilità della trasformazione. Attraverso una riflessione teorica e il confronto fra il caso studio Quinta Monroy, la trasformazione di 530 alloggi del Grand Parc a Bordeaux e la cooperativa La Borda a Barcellona, le azioni concettuali, comparative e valutative delle autrici rendono trasferibile un modello interpretativo applicabile a contesti abitativi diversi, purché adattabilità costruttiva, accessibilità economica, regole di gestione e partecipazione degli utenti siano considerate congiuntamente (Askar, Bragança and Gervásio, 2021).

Paris e Vannini (2026) portano la riflessione dentro il Patrimonio dell'Edilizia Residenziale Pubblica (ERP) romana realizzato con processi industrializzati e componenti prefabbricati, assumendo il digitale come infrastruttura di conoscenza e non come semplice strumento di rappresentazione. Il contributo lavora sulla scala dell'edificio, dei sistemi edilizi e dei componenti ma mantiene un costante rapporto con la dimensione sociale e urbana delle periferie pubbliche. Il legame con gli SDG 9 e 10 è diretto perché innovare il Patrimonio ERP significa dotarsi di strumenti capaci di guidare scelte tecniche e gestionali senza aggravare la vulnerabilità degli abitanti; le sinergie con energia pulita e accessibile e città sostenibili (SDG 7 e 11) emergono dalla possibilità di migliorare comfort, prestazioni, accessibilità e qualità degli spazi condivisi mentre il compromesso principale riguarda la necessità di bilanciare prestazione, costi, durata del cantiere, permanenza degli abitanti e capacità gestionale degli Enti proprietari. In questa prospettiva l'Atlante Digitale, la matrice decisionale e l'abaco operativo costituiscono azioni conoscitive, progettuali e decisionali che rendono leggibili criticità, margini di trasformazione, priorità e compromessi degli interventi, con particolare attenzione alle 'parti morbide' dell'abitare; la trasferibilità del metodo deriva dalla scomposizione per sistemi, sottosistemi, componenti e nodi, adattabile ad altri Patrimoni pubblici industrializzati e utile a orientare trasformazioni incrementali, reversibili e compatibili con la continuità d'uso degli edifici abitati.

Dal sistema dell'abitare la sequenza si sposta quindi alla scala dell'involucro, del sistema tecnico e del componente edilizio, dove l'innovazione assume una forma più direttamente costruttiva e misurabile. È in questa soglia che SDG 9 e 10 si confrontano con un nodo decisivo: trasformare il Patrimonio esistente, migliorare le prestazioni ambientali e rendere industrializzabili soluzioni avanzate senza produrre nuovi divari di costo, competenza e accesso. L'involucro non è più soltanto chiusura o interfaccia climatica ma diventa dispositivo di mediazione tra materia, produzione, manutenzione, comfort, decarbonizzazione e qualità dello spazio. Paoletti et alii (2026) affrontano questo passaggio propo-

19
2026
AGATHÓN
International Journal
of Architecture, Art and Design

ISSN print: 2464-9309 – ISSN online: 2532-683X

nendo il Nature-based Retrofit System (NoRS), un sistema prefabbricato a base biologica per il retrofit energetico degli edifici esistenti. Il contributo colloca la decarbonizzazione del Patrimonio edilizio dentro una prospettiva di ciclo di vita, ricordando che la riduzione dei consumi operativi non è sufficiente se non si considerano carbonio incorporato, scenari di fine vita e distribuzione temporale delle emissioni. La rilevanza rispetto all'SDG 9 riguarda la costruzione di un supporto decisionale replicabile per industrializzare interventi di retrofit a bassa impronta climatica; le sinergie con città sostenibili, consumo responsabile e azione per il clima (SDG 11, 12 e 13) derivano dalla possibilità di connettere prestazione energetica, circolarità e gestione selettiva dei componenti mentre il compromesso principale riguarda il fatto che i benefici dei materiali a base biologica non sono automatici e dipendono dalla rigenerazione della biomassa, dalle filiere di fine vita, dalle emissioni differite e dalla capacità di valutare gli impatti nel tempo. Le azioni progettuali, tecnologiche, valutative e normative degli autori, fondate su prefabbricazione leggera, assemblaggio a secco, principi di progettazione per la produzione, l'assemblaggio e lo smontaggio, materiali a base biologica e valutazione dinamica del ciclo di vita, rendono trasferibile non un solo prodotto, ma un quadro comparativo applicabile ad altri sistemi di retrofit (Levasseur et alii, 2010).

Romano e Mazzoni (2026) portano il tema dell'involucro nella dimensione della rigenerazione urbana minuta, interpretando la facciata vegetata come infrastruttura ecologica, educativa e tecnologica. Il progetto Urban Bloomers sperimenta sistemi Tech-NbS stampati in argilla con manifattura additiva e co-progettati con comunità scolastiche, ricercatori, imprese e attori istituzionali, assumendo gli spazi ricreativi delle scuole fiorentine come micro-laboratori urbani. Il contributo attiva sinergie con istruzione di qualità, innovazione, azione per il clima e vita sulla terra (SDG 4, 9, 13 e 15), mostrando come un componente di facciata possa diventare occasione di apprendimento ambientale e di rigenerazione biofila alla scala dello spazio scolastico, del quartiere e della rete verde urbana. Il compromesso riguarda la maturazione tecnologica del sistema che richiede monitoraggio nel tempo, verifica della durabilità, valutazioni ambientali e controllo dei costi prima di passare stabilmente dal prototipo all'applicazione urbana diffusa. Le azioni sperimentali, partecipative, formative e di monitoraggio, costruite attraverso osservazione della biodiversità, scelta delle specie vegetali, modellazione parametrica, prototipazione e verifica in situ, rendono trasferibile la combinazione di partecipazione, validazione biologica e manifattura additiva ad altri contesti scolastici mediterranei (Snep et alii, 2020). Un secondo contributo di Paoletti et alii (2026) restringe ulteriormente la scala fino al macro-componente di facciata, interrogando il trasferimento tecnologico dal settore automobilistico al settore delle costruzioni come leva per governare la complessità dell'involucro contemporaneo. La relazione con l'SDG 9 è diretta: il contributo mostra come l'industrializzazione della complessità possa migliorare efficienza materiale, controllo del processo e qualità costruttiva; le sinergie con città sostenibili e consumo responsabile (SDG 11 e 12) emergono nella riduzione della massa, nella maggiore coerenza tra progettazione e produzione e nella predisposizione alla manutenzione e allo smontaggio. Il compromesso riguarda il rapporto tra standardizzazione e specificità architettonica: trasferire logiche industriali non significa imporre uniformità ma costruire regole di processo capaci di sostenere variabilità, prestazione e riduzione degli impatti senza aumentare frammentazione e dipendenza da competenze specialistiche. Le azioni progettuali, ingegneristiche, produttive e valutative, fondate su modellazione parametrica, ottimizzazione topologica, verifica strutturale e analisi del ciclo di vita, rendono trasferibile un protocollo progressivo di sviluppo del componente, adattabile ad altri sistemi edilizi purché siano definite interfacce, criteri di controllo e passaggi di validazione (Laghi, Savino and Gasparini, 2025).

Il passaggio dalle tecnologie dell'edificio ai sistemi produttivi e alle filiere mostra che la transizione non si esaurisce nella qualità del singolo manufatto ma dipende dall'organizzazione dei processi, dalla disponibilità dei dati, dalle competenze e dalla distribuzione del valore lungo catene produttive spesso frammentate. A questa scala l'SDG 9 riguarda la capacità di aggiornare i sistemi industriali, energetici e logistici mentre l'SDG 10 impone di verificare se tale aggiornamento sia accessibile anche alle imprese meno strutturate, ai territori periferici e alle comunità produttive che rischiano di rimanere ai margini dell'innovazione. Losco, Pasqualini e Khodaparast (2026) affrontano questo nodo proponendo un quadro metodologico per valutare congiuntamente le prestazioni energetiche e la circolarità nei sistemi industriali e presentano il caso applicativo dello stabilimento di una grande azienda agroalimentare, assunto quale ambito di verifica per interventi di efficientamento energetico e di autoproduzione da fonti rinnovabili. La relazione con l'SDG 9 è diretta poiché il contributo propone strumenti per modernizzare l'industria e renderla più efficiente; le sinergie con energia pulita, consumo responsabile e azione per il clima (SDG 7, 12 e 13) derivano dalla riduzione dei consumi e dalla maggiore capacità di controllo dei processi; il compromesso riguarda l'SDG 10: sistemi digitali, monitoraggio capillare e competenze specialistiche possono aumentare il divario tra grandi imprese e PMI se non accompagnati da strumenti accessibili e politiche di sostegno. Le azioni tecniche, gestionali e valutative degli autori, che integrano diagnosi energetica, misurazione della circolarità, monitoraggio digitale dei vettori energetici e simulazione dinamica, rendono trasferibile un metodo adattabile anche a contesti produttivi meno dotati di risorse tecniche, a condizione che la transizione industriale non resti prerogativa di soggetti già competitivi (European Commission, 2019).

Il contributo di Pietroni et alii (2026) sposta l'attenzione dal singolo stabilimento al settore legno-arredo del Made in Italy, interpretato come sistema manifatturiero identitario, radicato nei distretti e oggi sollecitato dalla duplice transizione ecologica e digitale. L'analisi dei casi aziendali mostra che la digitalizzazione della filiera, il Passaporto Digitale di Prodotto, la valutazione del ciclo di vita, la tracciabilità dei materiali e le strategie di ecoprogettazione possono sostenere modelli più circolari, ma solo se integrati con la cultura produttiva e con le capacità organizzative delle imprese. Le sinergie coinvolgono lavoro dignitoso, consumo responsabile e azione per il clima (SDG 8, 12 e 13) mentre il

19
2026
AGATHÓN
International Journal
of Architecture, Art and Design

ISSN print: 2464-9309 – ISSN online: 2532-683X

rapporto con l'SDG 10 emerge nel rischio che la doppia transizione aumenti il divario tra imprese capaci di investire in strumenti digitali e piccole realtà produttive prive di risorse economiche e competenze adeguate. Il compromesso è quindi interno alla trasformazione stessa del settore: innovazione digitale e circolarità possono rafforzare competitività e sostenibilità ma possono anche selezionare gli attori più preparati e indebolire le imprese meno strutturate. Le azioni interpretative e di indirizzo sviluppate dagli autori, riferite alla scala settoriale, distrettuale e di prodotto, rendono trasferibile una lettura applicabile ad altri distretti manifatturieri ad alta intensità artigianale, nei quali innovazione, continuità del saper fare, durabilità, disassemblaggio e aggiornabilità devono essere governati insieme (Antikainen, Uusitalo and Kivikytö-Reponen, 2018).

Un primo contributo di Ayala-Garcia et alii (2026) porta la riflessione sulle filiere agro-industriali dell'Alto Adige, dove sottoprodotti provenienti dai settori lattiero-caseario, birrario, della distillazione della frutta e dell'allevamento ovino sono analizzati come risorse materiali secondarie. Siero di latte, trebbie di birra, noccioli di albicocca e lana locale sono esaminati da prospettive materiali, tecnologiche e sistemiche, con l'obiettivo di individuare percorsi di valorizzazione coerenti con le filiere locali. Il contributo collega l'SDG 9 alla capacità di costruire innovazione a partire da risorse sottoutilizzate e l'SDG 10 alla possibilità di redistribuire valore verso reti locali di produttori, ricercatori e imprese; la sinergia con il consumo responsabile (SDG 12) è particolarmente evidente, perché la ricerca mostra come lo scarto diventi risorsa solo quando esistono infrastrutture di raccolta, trasformazione, collaborazione e mercato. Il compromesso riguarda la distanza tra potenziale materiale e fattibilità reale, spesso condizionata da norme, costi di trattamento, volumi disponibili e continuità delle relazioni tra attori. In questa prospettiva le azioni di mappatura, indagine sui flussi residui, sperimentazione materiale e valutazione delle condizioni normative ed economiche rendono trasferibile un metodo applicabile ad altri territori caratterizzati da filiere corte e sottoprodotti ricorrenti. Il secondo contributo di Ayala-Garcia et alii (2026) restringe ulteriormente la scala alla filiera dell'anacardio nel Vichada colombiano, dove carenze infrastrutturali, strumenti autoprodotti e limitata disponibilità tecnologica incidono su sicurezza, produttività e distribuzione del valore. Il progetto Jurui collega in modo diretto gli SDG 9 e 10 perché mostra come l'innovazione possa nascere dall'adeguamento di strumenti quotidiani e non dalla sostituzione delle pratiche locali con tecnologie importate; le sinergie con lavoro dignitoso e consumo responsabile (SDG 8 e 12) emergono nella riduzione dei rischi per gli operatori e nella valorizzazione dei residui. Il compromesso riguarda la scalabilità, perché ogni miglioramento tecnico deve rimanere compatibile con risorse, manutenzione, saperi e condizioni economiche della comunità produttiva. Le azioni di osservazione diretta, co-progettazione, sperimentazione materica e validazione tecnica rendono trasferibile non il contenitore in sé ma un metodo di progetto centrato sulle persone, nel quale il contenitore diventa punto di connessione tra ergonomia, sicurezza, flussi materiali, conservazione della materia prima e rafforzamento delle competenze locali (Bull and Banik, 2025).

Un ulteriore passaggio di scala conduce al servizio e all'interfaccia, dove l'innovazione è valutata nella capacità di orientare pratiche d'uso, sicurezza, apprendimento e accessibilità. A questa scala gli SDG 9 e 10 diventano condizioni operative: il prodotto è piattaforma di relazioni tra utenti, servizi, dati e contesti d'uso in cui l'interfaccia non si limita a restituire informazioni ma organizza decisioni, responsabilità e margini di autonomia. Il contributo di Rinaldi e Lagrimino (2026) affronta la micromobilità urbana assumendo la modularità come leva per connettere mobilità personale e logistica di prossimità: a partire da un veicolo leggero riconfigurabile sviluppato nel quadro del Centro Nazionale per la Mobilità Sostenibile la ricerca costruisce un modello interpretativo fondato su fattori ricorrenti dei sistemi di micromobilità e propone uno scenario di micromobilità professionale ibrida. Le sinergie con città sostenibili, consumo responsabile e azione per il clima (SDG 11, 12 e 13) sono evidenti nella riduzione della dipendenza dal trasporto motorizzato e nella possibilità di riconfigurare i servizi urbani a minore impatto. Il compromesso riguarda il rischio che la flessibilità del veicolo resti una possibilità tecnica se non è sostenuta da infrastrutture sicure, accessibilità economica e politiche urbane capaci di integrare realmente mobilità quotidiana e logistica leggera. Le azioni analitiche, progettuali e strategiche degli autori, riferite alla scala dell'oggetto-prodotto e del servizio urbano, rendono trasferibile la logica modulare a contesti con differenti densità, dotazioni ciclabili e modelli di gestione, purché bicicletta, cargo bike, piattaforma d'uso, gestione delle flotte e relazioni con il trasporto pubblico siano considerati come parti di un unico sistema urbano.

Con Zignego et alii (2026) l'attenzione si sposta dall'oggetto mobile all'interfaccia formativa nei domini critici per la sicurezza. Il caso On Watch e il quadro Designer-in-the-Loop introducono gli Human State Monitoring Systems nella formazione marittima come strumenti di supporto al riesame finale, all'apprendimento dall'errore e alla cultura della sicurezza. Il contributo collega gli SDG 9 e 10 a quelli relativi all'istruzione di qualità e al lavoro dignitoso (SDG 4 e 8) poiché l'innovazione digitale può migliorare la preparazione nei contesti ad alta criticità solo se evita di trasformarsi in sorveglianza o in una graduatoria automatica. Il compromesso principale è esplicito: quanto più aumentano le capacità di monitoraggio tanto più diventa necessario progettare limiti d'uso, responsabilità e garanzie contro distorsioni e disuguaglianze. Le azioni progettuali, valutative, formative e di governo dei dati, con indicatori tecnico-operativi e socio-distributivi pensati per verificare utilità, accettabilità, qualità dei dati e rischi di uso improprio rendono trasferibile il metodo verso altri domini della sicurezza a condizione che siano chiari i vincoli progettuali: minimizzazione dei dati, consenso, separazione delle informazioni identificative, controllo umano e valutazione ex ante ed ex post. Oppedisano, Rossi e Scortichini (2026) chiudono questo passaggio scalare concentrandosi sull'aula scolastica come ambiente in cui oggetto, spazio e infrastruttura digitale convergono nella preparazione all'emergenza. L'Immersive Learning Environment sviluppato per il Life Saving Furniture System integra realtà virtuale, contenuti, realtà aumentata e gemello digitale statico dell'aula per rendere più comprensibili arredi salva-

19
2026
AGATHÓN
International Journal
of Architecture, Art and Design

ISSN print: 2464-9309 – ISSN online: 2532-683X

vita, azioni e procedure durante un evento sismico. Le sinergie coinvolgono istruzione di qualità, innovazione, riduzione delle disuguaglianze e città sostenibili (SDG 4, 9, 10 e 11), poiché la sicurezza scolastica dipende non solo dalla prestazione strutturale ma dalla capacità degli utenti di riconoscere e usare correttamente i dispositivi disponibili. Il compromesso consiste nel non trasformare l'apprendimento immersivo in un livello aggiuntivo separato dal progetto ma in una componente integrata dell'innovazione stessa. Le azioni progettuali, formative, sperimentali e valutative, strutturate nel ciclo fisico-virtuale-fisico, rendono trasferibile l'approccio a scuole e altri ambienti collettivi in aree a rischio, purché siano affrontati costi, accessibilità tecnologica, manutenzione dei contenuti e formazione degli operatori.

La sequenza scalare giunge quindi alla superficie e alla materia, dove l'innovazione diventa verificabile nel rapporto tra geometria, percezione, comportamento dei materiali e processi di fabbricazione. A questo livello l'SDG 9 non riguarda più soltanto infrastrutture estese o sistemi produttivi ma la capacità di governare la qualità tecnica e sensoriale dei componenti; gli SDG connessi richiamano invece il controllo degli impatti, l'uso responsabile delle risorse, la durabilità e la possibilità di trasferire conoscenze senza impoverire i contesti che le generano. Il contributo di Alfarano, Spennato e Filieri (2026) interpreta le superfici come infrastrutture progettuali in grado di integrare configurazione geometrica, manifattura additiva e qualità percettiva dello spazio. La scala è quella del modulo superficiale ma le implicazioni riguardano l'ambiente interno, l'architettura e i processi produttivi dell'Industria 5.0: mediante modellazione parametrica e prototipazione con stampa 3D gli autori verificano come variazioni controllate di geometria, densità e serialità possano generare effetti visivi e spaziali differenziati. Il contributo collega l'SDG 9 alla possibilità di governare la complessità geometrica e di tradurla in un sistema produttivo flessibile mentre le sinergie con città sostenibili e consumo responsabile (SDG 11 e 12) emergono dalla progettazione di superfici riconfigurabili, adattabili a contesti d'uso diversi e potenzialmente integrabili nei processi di trasformazione dell'ambiente costruito. Tale potenziale richiede tuttavia una verifica critica poiché modularità e manifattura additiva non producono automaticamente benefici ambientali: materiali impiegati, consumi energetici, tempi di produzione, durabilità e scenari di fine vita restano variabili decisive da valutare lungo l'intero ciclo di vita. In questa prospettiva le azioni sperimentali, progettuali e valutative sviluppate dagli autori non si limitano alla produzione di prototipi ma interrogano le condizioni di replicabilità, adattabilità e sostenibilità dei sistemi superficiali; per questo la trasferibilità del metodo risiede nella sequenza che connette generazione parametrica, fabbricazione additiva, prototipazione e osservazione critica dei risultati (Gibson et alii, 2021).

Suksikarn (2026) chiude il percorso alla scala della materia e del prodotto analizzando lo 'yan-lipao', materiale tradizionale della Thailandia meridionale, come risorsa capace di connettere materiali di origine biologica, saperi artigianali e disegno industriale. Il contributo propone un quadro di innovazione ibrida tra artigianato e industria e lo verifica mediante un processo di progettazione co-creativa guidata dal materiale che combina documentazione delle tecniche tradizionali, caratterizzazione meccanica, laboratori con studenti e artigiani, modellazione digitale e realizzazione di prototipi. L'SDG 9 è qui riferito alla capacità di integrare conoscenza locale e strumenti progettuali contemporanei in processi produttivi più sostenibili; le sinergie con lavoro dignitoso, consumo e produzione responsabili e azione per il clima (SDG 8, 12 e 13) derivano dalla valorizzazione di materiali locali rinnovabili, dalla collaborazione con gli artigiani e dall'ipotesi di filiere più radicate nei contesti. Il compromesso riguarda il rischio di trasformare il sapere artigianale in risorsa estrattiva o in puro repertorio formale; per questo le azioni di documentazione, prova materiale, sperimentazione didattica, modellazione e prototipazione diventano trasferibili solo se mantengono una relazione effettiva con le comunità di pratica che quel materiale conoscono, lavorano e trasmettono; la riproduzione dello 'yan-lipao' in altri luoghi non è dunque l'obiettivo, mentre lo è il metodo con cui un sapere materiale locale può essere documentato, testato, reinterpretato e tradotto in prodotti contemporanei senza perdere il proprio radicamento culturale e produttivo (Karana et alii, 2015).

L'insieme degli articoli pubblicati nel volume 19 conferma quindi la necessità di intendere il progetto come infrastruttura critica della transizione, strumento capace di collegare conoscenza e azione, valutazione e decisione, innovazione e giustizia spaziale. L'impatto dei contributi non va ricercato nella pretesa di offrire soluzioni definitive ma nella capacità di mettere a disposizione linguaggi, metodi e criteri con cui orientare scelte più consapevoli. Agire a scale diverse con effetti multiscalari significa accettare che ogni intervento, anche minimo, partecipi a sistemi più ampi di risorse, diritti, competenze e responsabilità. È su questa consapevolezza che le discipline del progetto possono contribuire all'Agenda 2030 come luogo di mediazione scientifica, culturale e operativa in cui l'innovazione diventa credibile quando riduce divari, rafforza capacità e rende più equa la trasformazione dell'ambiente costruito. Il quadro che emerge non è tuttavia esaustivo e proprio per questo mantiene un interesse scientifico aperto: molte sperimentazioni richiedono verifiche di lungo periodo, basi dati più robuste, confronti internazionali più estesi e valutazioni ex post capaci di misurare non solo le prestazioni dichiarate ma anche gli effetti reali su comunità, utenti, lavoratori e territori. Alcuni contributi mostrano con chiarezza che la stessa innovazione può generare inclusione o nuove disuguaglianze: strumenti digitali e passaporti informativi possono abilitare la circolarità ma anche accentuare divari di competenza; soluzioni basate sulla natura possono ridurre emissioni ma anche spostare criticità sulle filiere; rigenerazioni urbane e territoriali possono produrre valore pubblico oppure alimentare processi estrattivi; dispositivi di monitoraggio e intelligenza artificiale possono sostenere apprendimento e sicurezza oppure introdurre forme di sorveglianza. La maturità dei contributi pubblicati sta nel non occultare tali tensioni e nel renderle parte dell'argomentazione progettuale.

Da questo punto di vista il volume offre indicazioni utili a comunità scientifiche, progettisti, Amministrazioni pubbliche, imprese, gestori di Patrimoni e infrastrutture, Istituzioni nel campo dell'istruzio-

19
2026
AGATHÓN
International Journal
of Architecture, Art and Design

ISSN print: 2464-9309 – ISSN online: 2532-683X

ne / formazione e soggetti del terzo settore. Ai ricercatori fornisce quadri analitici per rendere più verificabili sinergie e compromessi tra Obiettivi; ai progettisti suggerisce criteri per integrare prestazioni ambientali, accessibilità, usabilità, manutenzione e qualità sociale; ai decisori pubblici indica la necessità di passare da interventi episodici a programmi capaci di combinare dati, governance, risorse economiche e responsabilità nel tempo; alle imprese e alle filiere produttive propone una lettura dell'innovazione non limitata all'efficienza ma estesa alla tracciabilità, alla durabilità, alla circolarità e alla distribuzione dei benefici. In questa prospettiva i contributi alimentano il dibattito su temi centrali per le discipline del progetto: infrastrutture come sistemi di equità, transizione digitale come questione di accesso e controllo, rigenerazione come processo di lunga durata, materiali come nodi di filiere sociali e ambientali, tecnologie come dispositivi da governare e non soltanto da applicare. Nel loro insieme i contributi raccolti nel volume mostrano che l'azione progettuale orientata agli SDG 9 e 10 non può essere confinata a una sola scala né a un solo ambito disciplinare. L'innovazione diventa rilevante quando produce effetti misurabili e riconoscibili a scale diverse: una scelta sul carbonio o sul suolo modifica le priorità di Piano; il riuso di un edificio può incidere su economie territoriali e reti di cura; una facciata, un componente o un materiale può orientare filiere, manutenzione e cicli di vita; un'interfaccia o un ambiente di apprendimento può ridefinire accessibilità, sicurezza e responsabilità d'uso. Il valore del volume risiede proprio in questa lettura multiscalare attraverso un insieme di dispositivi concettuali, metodi, prototipi e strumenti valutativi che aiutano a comprendere come le decisioni puntuali possano generare ricadute sistemiche e come strategie generali richiedano verifiche operative nei luoghi, negli edifici, nei prodotti e nei materiali.

Volume 19 of AGATHÓN continues the trajectory initiated in previous issues devoted to the 2030 Agenda, focusing on two Sustainable Development Goals that operate as structuring mechanisms of the transition: Industry, Innovation, Infrastructure (SDG 9), and Reduce Inequalities (SDG 10). These two themes form part of the 17 Sustainable Development Goals adopted in September 2015 by the Member States of the United Nations (UN, 2015), and promoted as a call for urgent action capable of combining prosperity, equitable development, and protection of the planet, while enhancing cooperation among countries, national governments, local administrations, public institutions, private enterprises, civil society, and individuals. Only a few years before the deadline set for their achievement, however, this call requires the scientific community to undertake a reflection that can no longer be postponed: how far we have progressed, which trajectories we are following, and what margins for transformation remain viable. An assessment of progress based on comparable data has been proposed by the Global Sustainable Development Report (IGS, 2023), which has stressed the need for a substantial correction and acceleration of implementation policies. Without these, humanity will face prolonged periods of crisis and uncertainty, with the risk of further undermining both the principle of 'leaving no one behind' and the safeguarding of ecosystems. While the 2019 Report still recorded uneven advances that were partly consistent with the expected trajectories, the picture outlined by the 2023 Report is more critical: on some Goals, progress has not accelerated sufficiently, while on others – food security, climate action, and biodiversity protection – the world continues to move in a direction that is not compatible with sustainability.

In this context, it becomes essential to recognise that the SDGs do not operate as separate domains. As stated by the United Nations (UN, 2015) when they were defined, and as confirmed by the Global Sustainable Development Report 2019, many Goals activate synergistic relationships, particularly the social and environmental ones that influence the overall progress of the 2030 Agenda. The scientific literature on interlinkages among the SDGs also shows that there remains an underused potential for achieving simultaneous advances through integrated planning and coordinated strategies. At the same time, every advance may generate trade-offs: intensive agricultural policies, unmanaged economic growth, infrastructure development without environmental and social assessment, or inaccessible digital transitions can transfer ecological and social costs onto vulnerable territories and groups. It is no coincidence that the Global Sustainable Development Report 2023 points out that Goals 14 and 15 are often more negatively affected by progress achieved in other sectors than positively influenced by actions specifically dedicated to them (IGS, 2023).

The nature of these connections varies according to space, time, income levels, and the population groups involved: poverty reduction can generate overall positive effects in low-income countries, whereas in high-income countries integrated strategies capable of addressing climate change and inequalities simultaneously are decisive; these same countries, however, appear to face a greater number of trade-offs, a condition that may help explain their slower progress towards the SDGs (Lusseau and Mancini, 2019; Kostetckaia and Hametner, 2022). Added to this is the cross-border character of many interlinkages: according to the OECD (2019, 2024), 57% of the 169 targets achievable in one country can generate repercussions in other regions of the world through flows of capital, goods, human and natural resources. In this sense, producing negative impacts elsewhere represents an ethical, environmental, and economic cost; failing to recognise possible positive repercussions in distant contexts means losing opportunities for rebalancing and cooperation. These conditions require a systemic understanding of synergies and trade-offs, useful both for guiding research and for defining instruments capable of reducing critical issues, governing uncertainties, and enhancing context-specific opportunities. Methods are now available for integrated analysis of the Goals, decision support, and progress monitoring (Barquet et alii, 2022), including preliminary impact-assessment tools promoted by the European Commission (2023). What still appears insufficient is the capacity to translate these frameworks into practices of design, production, construction, management, and maintenance able to measure the effects of policies, plans, technologies, and actions over time. Thinking in systemic terms therefore means questioning not only the immediate effectiveness of

19
2026
AGATHÓN
International Journal
of Architecture, Art and Design

ISSN print: 2464-9309 – ISSN online: 2532-683X

solutions, but also their distributive, environmental, and institutional repercussions, before and after their implementation.

From this perspective, SDG 9 and SDG 10 constitute a critical pair of Goals. The former does not concern only industry, infrastructure, and innovation in a technical and productive sense, but the possibility of developing material, digital, and organisational systems capable of generating value without exceeding planetary boundaries. The latter requires verification of who gains access to these benefits, who bears their costs, and which groups or territories risk being excluded from them. Innovation and infrastructural development, when not guided by criteria of equity, can reinforce existing gaps between centres and peripheries, between urban and rural areas, between large companies and small production enterprises, and between communities with institutional capacity and contexts with fewer technical, financial, and cognitive resources. Conversely, when designed as infrastructures of access, care, training, decent work, and redistribution, they can become decisive levers for reducing vulnerability and inequality. The built environment lies at the centre of this tension: it interacts with every Goal (Thorne and Duran, 2016), while also representing one of the major contemporary challenges; it consumes energy and natural resources, produces emissions and waste, affects health, conditions access to services, opportunities, and quality spaces, and can either amplify or mitigate inequalities. This issue becomes particularly relevant in cities, whose importance in terms of vulnerability and opportunity is implicit in all the SDGs, especially considering that by 2050 around 70% of the world's population will live in urbanised areas (UN-Habitat, 2022). At the same time, fragile territories, inland areas, abandoned heritage assets, local production systems, and material supply chains show that the transition cannot be confined to the compact city or to technological innovation alone, but must pass through every scale of design, from landscape to matter.

On the basis of these reflections, Volume 19 of AGATHÓN brings together research contributions, experiments, and critical reflections situated within the fields of Landscape, Urban Planning, Architectural and Urban Design, Engineering, Architectural Technology, Design, and Recovery, with the intention of fostering an open debate on the theme 'Industry, Innovation, Infrastructure (SDG 9), and Reduce Inequalities (SDG 10) | Projects, research, synergies, and trade-offs'. The published contributions adopt a multidisciplinary and multiscalar approach, addressing process issues, methodologies, ex ante and ex post evaluation models, the overcoming of limits, gaps, and barriers, the enhancement of synergies, and the containment of trade-offs with the other Goals. The editorial that follows aims to convey this complexity through a sequence of scales: from the theoretical, cognitive, and relational infrastructures of innovation to landscape and territorial systems; from cities and settlements to the building; from the envelope to supply chains; and from objects and interfaces to surface and matter. The aim is not to describe the contributions as isolated cases, but to recognise within them transferable instruments for accelerating the implementation of the 2030 Agenda, making explicit the conditions, benefits, and trade-offs that every design action entails.

An initial group of contributions concerns the theoretical, cognitive, relational, knowledge-based, and information infrastructures through which innovation and the reduction of inequalities can be developed, measured, and governed. From this perspective, the volume does not treat SDG 9 as a mere reference to technologies, industrial processes, or material facilities, nor SDG 10 as a social corrective added ex post; rather, it considers them as a unified field in which methods, data, relations, experiences, and evaluation systems define the very conditions of design action. The contribution by Canina and Efremenko (2026) opens this trajectory by interpreting innovation as an anticipatory and collaborative process, capable of engaging with the complexity of sustainable transitions and with the trade-offs among the different SDGs. The MUSAE project and its operating model propose an art-led methodological framework, oriented towards futures exploration and consistent with the Industry 5.0 paradigm, in which artistic experimentation, design, technological development, and co-creation with artificial intelligence are integrated within a pathway capable of producing shared prototypes and scenarios. The scale is not that of the object or the building, but that of the innovation ecosystem, in which a system of actors, methods, and devices operates across research, enterprise, culture, and society. The contribution links SDG 9 to the construction of enabling infrastructures for more sustainable production models, with explicit synergies in relation to responsible consumption and production, climate action, and the protection of terrestrial ecosystems (SDGs 12, 13, and 15). This potential, however, requires governing the risk that advanced technologies and artificial intelligence may reinforce divides in access, capabilities, and control. From this perspective, the conceptual, methodological, educational, and experimental actions developed by the authors do not merely imagine future scenarios, but make the tensions of the transition discussable and negotiable from the earliest stages of the process. For this reason, the transferability of the method lies in its applicability to contexts in which innovation must be designed even before it is implemented (European Commission, 2021).

Ingaramo et alii (2026) address the question of measurability by proposing a methodological framework for evaluating the role of design in innovation ecosystems at the meso level, based on research through design, key performance indicators, artificial-intelligence-assisted analysis, and expert interviews. Lombardy, São Paulo, and Stockholm-Uppsala are taken as comparative contexts to verify the extent to which design is present in ecosystems, while often remaining invisible in measurement systems. The scale is the intermediate one of regional innovation networks, partnerships between universities and enterprises, policies, and competence infrastructures. The synergies identified by the authors involve, in addition to SDG 9, partnerships for the Goals, quality education, and decent work (SDGs 17, 4, and 8), since making the contribution of design measurable means orienting resources, alliances, training, and knowledge transfer. The trade-off, however, is significant: every metric can make certain phenomena legible while obscuring others, especially when tacit knowledge, informal relations, and local capacities are translated into proxy indicators. From this perspective, the evaluative, methodological, and policy-

19
2026
AGATHÓN
International Journal
of Architecture, Art and Design

ISSN print: 2464-9309 – ISSN online: 2532-683X

oriented actions implemented by the authors define a comparative structure adaptable to other ecosystems, whose transferability depends on the capacity to use indicators as interpretative tools rather than as reductive classification devices (Galindo-Rueda and Millot, 2015).

The transition from measurement to relational processes is developed by Tamborrini, Russo, and Marino (2026), who interpret design as a relational infrastructure among universities, territories, and production systems. The analysis of the two editions of Design&Territori allows the authors to observe the transformation of university design practices from a focus on products and processes towards services, networks, local capacities, and cognitive continuity. The scale is territorial and educational, but does not coincide with a stable geographical perimeter, because it concerns the set of relations through which design produces learning, trust, contextual interpretation, and shared responsibility. The contribution directly connects SDG 9 and SDG 10, showing that territorial innovation cannot be assessed solely on the basis of technological or productive facilities, but must examine the capacity to construct durable links among knowledge, communities, and economic systems. The trade-off concerns the continuity of these relations: without time, institutional recognition, and reciprocal responsibility, collaboration between universities and territories risks remaining episodic. The conceptual, educational, institutional, and third-mission actions therefore acquire transferable value when design operates as a mediating practice capable of making latent relations visible and transforming them into operational capacities (Manzini, 2015).

The contribution by Russo (2026) shifts this reflection onto the structure of the designed experience, arguing that in contemporary design aesthetics and ethics are not separate domains, but immanent dimensions of the same configuration. The essay crosses different scales – product, service, digital interface, and inhabitable space – to show that design organises access, practices, behaviours, and possibilities of use. The declared synergies concern health and well-being, infrastructure and innovation, reduce inequalities, and responsible consumption (SDGs 3, 9, 10, and 12), since every formal, perceptual, or functional choice can facilitate, orient, or prevent specific behaviours. The most significant trade-off is internal to the very idea of facilitation: a fluid experience can improve accessibility and well-being, but it can also conceal power relations, exclusions, or undeclared automatisms. From this perspective, the conceptual and evaluative actions proposed by the author, based on categories such as hypo-aesthetics, hyper-aesthetics, and facilitation, make aesthetic analysis transferable as an instrument of design responsibility, rather than as an ancillary judgement on form (Dorfles, 1972).

The group of theoretical-methodological contributions closes with Demirel and Çıtak (2026), who relate the question of innovation to the construction of information infrastructures for the built environment. The systematic review devoted to building passports, material passports, and digital building logbooks shows that these instruments cannot be interpreted as simple technical archives, because they define who accesses information, who controls data, how costs and benefits are distributed throughout the life cycle, and which institutional capacities are required for implementation. Their relevance to SDG 9 and SDG 10 is direct, while synergies with sustainable cities and responsible consumption (SDGs 11 and 12) derive from the possibility of making reuse, maintenance, circularity, and heritage management more transparent. The trade-off is equally clear: without digital literacy, access rules, and administrative capacity, passports risk reinforcing the gap between actors able to use data and actors who are merely affected by their consequences. The socio-technical actions identified by the authors – traceability, interoperability, governance arrangements, and decision support – make transferable an analytical matrix of distributive, procedural, and infrastructural equity, useful for evaluating data and digital tools as components of a broader politics of circularity (Buchholz and Lützkendorf, 2023).

A second group of contributions investigates the landscape, territorial, and ecosystem scale, where the relationship between SDG 9 and SDG 10 takes on an explicit spatial dimension. From this perspective, ‘providing infrastructure’ does not simply mean constructing works or introducing technologies, but making legible the relations among soil, ecosystems, heritage, local economies, communities, and governance capacities. It is at this scale that the benefits of innovation can become instruments of rebalancing or, if not governed, widen the gap between attractive and marginal territories, and between communities endowed with decision-making resources and contexts lacking adequate knowledge tools. The contribution by Moraci et alii (2026) opens this investigation by interpreting carbon not only as a climate indicator, but as a cognitive infrastructure for climate-responsive planning. The GIS-R procedure applied to the Fiumara Calopinace basin translates the ecosystem classification of Carta Natura into categories compatible with IPCC references, allowing carbon stock and absorption potential to be estimated and enabling comparison among the current ecosystem condition, the existing planning framework, and transformation scenarios. Its relevance to SDG 9 concerns the construction of open, replicable, and scientifically verifiable decision-support tools, while synergies with sustainable cities and communities, climate action, and life on land (SDGs 11, 13, and 15) derive from the possibility of linking ecosystem services, land uses, and climate vulnerability. The trade-off concerns the reduction of ecosystem complexity to manageable metrics, which is necessary to orient decisions, but is always exposed to the risk of simplifying biophysical, social, and temporal relations. From this perspective, the authors’ knowledge-based, evaluative, and planning action makes transferable an operational workflow adaptable to other Mediterranean contexts characterised by ecological fragility and settlement pressure, offering a useful basis for ex ante and ex post assessments. Barelles-Vicente et alii (2026) shift attention to marginal rural contexts and to the way in which built heritage can become territorial infrastructure. The case of the former Church of Trinidad in the fortified village of Moya (Spain) allows the authors to verify adaptive reuse as a device capable of activating flows, services, governance, and continuity of use. The scale is both settlement-based and territorial: the single reconstructed artefact is evaluated according to its capacity to influence a rural system marked by depopulation, reduced access to services, and economic fragility. The link with SDG 9 and SDG 10 is direct, because reuse can support light infrastructural development, local economies, and

19
2026
AGATHÓN
International Journal
of Architecture, Art and Design

ISSN print: 2464-9309 – ISSN online: 2532-683X

the reduction of territorial inequalities only when it moves beyond the logic of isolated conservation and becomes part of a stable management network. The trade-off, acknowledged by the authors, concerns dependence on available data, institutional continuity, and longitudinal verification, without which reuse risks remaining an isolated episode rather than a lever for lasting development. The design, management, and evaluative actions therefore converge into a four-dimensional framework, based on indicators relating to social activation, visitor flows, governance stability, and intervention strategy, whose transferability lies in the possibility of applying ex post evaluation to other rural settlements subject to demographic decline (Augustiniok et alii, 2025).

The transition from rural heritage to cultural and tourism ecosystems is addressed by Bonini Lessing et alii (2026), who place museums and cultural institutions at the centre of strategies for regenerative tourism in Mediterranean territories. Within the Med4Regen project, tourism is understood as a system of relations to be transformed, in which visitors, residents, cultural centres, associations, and administrations can construct new forms of environmental, social, and economic value. The contribution links SDG 9 to organisational and cultural innovation and SDG 10 to the redistribution of benefits between resident communities and visitors. Synergies with sustainable cities and responsible consumption (SDGs 11 and 12) emerge in the proposal to overcome tourism monoculture by strengthening cultural presences and local networks. The trade-off concerns the risk that regenerative practices may be absorbed by the same extractive dynamics they intend to counteract, unless they are supported by governance, institutional continuity, and the critical capacity of local actors. The territorial and urban scale of the method, particularly relevant in contexts subject to strong tourism pressure, is translated into participatory, educational, and design actions – context analysis, competence strengthening, co-diagnosis, co-design, and pilot actions – whose transferability depends on the adaptability of the hyperlocal framework to different territories, rather than on the replication of individual solutions (Bellato and Pollock, 2025).

From the landscape and territorial scale, the argument then focuses on settlement and urban systems, where infrastructures, services, and collective spaces become devices of redistribution. At this intermediate threshold, between territory and city, innovation does not coincide with the addition of new facilities, but with the capacity to reorder existing networks, underused heritage assets, and proximity systems in order to reduce access gaps, social fragilities, and climate vulnerabilities. The contribution by Villani and Mezzalana (2026) interprets villages affected by depopulation as possible care infrastructures for people in the early stages of Alzheimer's disease, relating heritage regeneration, proximity care, and territorial welfare. Its relevance to the SDGs is evident: health and well-being, reduce inequalities, sustainable cities and communities, and climate action (SDGs 3, 10, 11, and 13) converge in the possibility of transforming marginalised inland areas into active contexts of social experimentation. The trade-off concerns the managerial sustainability of this transformation, since without adequate institutional arrangements and operational resources, the reuse of heritage risks producing fragile models that are difficult to sustain beyond the experimental phase. The analytical, metadesign, care-related, and managerial actions, based on comparison with innovative residential models for dementia and translated into criteria applicable to the village of Cicignano, make the method transferable, provided that spatial quality, services, healthcare provision, local actors, and continuity of management are considered jointly (Ricci, Battisti and Monardo, 2014).

From distributed care in small settlements, the volume moves to the network of mobility infrastructures, with the contribution by Vettori et alii (2026) devoted to the regeneration of railway districts in Lombardy. The 'station' is not read as a simple transit node, but as a territorial infrastructure of proximity, capable of connecting public mobility, open space, services, intermodality, and social cohesion. The authors' investigation is multiscalar by nature: regional in its reading of the network, urban in the relationship between station and neighbourhood, and architectural in the evaluation of buildings and underused spaces. The contribution engages directly with SDGs 9, 10, 11, and 13, because it turns railway infrastructure into a support for sustainable mobility and, at the same time, into a device of territorial equity. The trade-off concerns the difficulty of reconciling infrastructural efficiency, heritage protection, safety, functional modernisation, and the quality of public space. Precisely for this reason, the knowledge-based, evaluative, and programmatic actions developed by the authors, through a multicriteria tool applied to the Lombardy station system and tested in the case of Milano Cadorna, make transferable a modular structure adaptable to other railway networks characterised by widespread heritage assets, different management conditions, and the need to establish intervention priorities (Bruno et alii, 2024).

In the contribution by Nguyen (2026), the city is observed through the industrial heritage of Hanoi, where rapid Asian urbanisation produces a paradoxical condition: the city enters a post-industrial phase while industrialisation is still under way. Productive sites that have been abandoned or are being relocated are therefore not only traces of the past, but potential urban infrastructures, capable of accommodating new cultural, productive, social, and environmental uses. The contribution intersects SDGs 8, 9, 11, and 17 by linking infrastructure and innovation, work, sustainable cities, and partnerships, with an evident trade-off: regeneration can generate employment, services, and urban identity, but it can also fuel property-led substitution and loss of memory if it is not supported by public instruments, participation, and cultural recognition. The scale of the study crosses the industrial artefact, the neighbourhood, the city, and urban governance arrangements. Within this framework, the authors' knowledge-based, comparative, and decision-making action, based on a corpus of local industrial sites, questionnaires, and international case studies, makes transferable a Strategic Assessment Tool not as the application of European models to Hanoi, but as the construction of criteria able to recognise the value of industrial heritage from different historical periods (UNESCO, 2023).

Pashako and Baboçi (2026) bring the theme of urban infrastructure back to the network of schools in Tirana (Albania), understood as civic devices that affect the form of the city, the distribution of opportunities, and the quality of public space. The scale is urban and neighbourhood-based: the individual school

19
2026
AGATHÓN
International Journal
of Architecture, Art and Design

ISSN print: 2464-9309 – ISSN online: 2532-683X

building is read in relation to mobility, accessibility, open spaces, catchment areas, and metropolitan growth processes. The contribution activates synergies among quality education, infrastructure, reduce inequalities, and sustainable cities (SDGs 4, 9, 10, and 11), shifting the theme of the school from building upgrading alone to the construction of urban proximity. The trade-off concerns the possibility that large building programmes may improve quantitative provision without truly affecting accessibility, the continuity of public spaces, and the collective use of services. The critical-interpretative and cartographic actions, based on the reading of planning instruments, the analysis of three case studies, and accessibility mapping, make transferable the use of the school as an indicator of spatial justice in metropolitan contexts marked by rapid growth and incomplete distribution of services (Amin, 2014). The urban question assumes a climate-related inflection in the contribution by Longo et alii (2026), which interprets climate shelters as permanent adaptive infrastructures for reducing inequalities. The starting point is the recognition that heatwaves do not affect everyone in the same way: elderly people, people with reduced mobility, economically fragile groups, and isolated populations suffer the effects of rising temperatures more severely. The synergies concern health and well-being, reduce inequalities, sustainable cities, and climate action (SDGs 3, 10, 11, and 13), while the trade-off consists in the risk of constructing climate maps and facilities without a real capacity for maintenance, inclusion, and social activation. The analytical, design, digital, and participatory actions, developed through a critical literature review, comparison with international cases, and experiments in Bologna, make transferable the passage from emergency interventions to permanent networks of environmental comfort, capable of orienting urban policies and investment priorities only if the climate shelter becomes a recognisable, accessible, and stable service over time (IPCC, 2023).

The group of contributions investigating the urban scale closes with the contribution by Talamo et alii (2026) on the concept of the Socio-Circular Ecosystem, used to interpret the circular economy not only as an optimisation of materials and waste, but as a spatial and relational system based on the sharing of tangible and intangible resources. The scale is meso and macro: neighbourhoods, districts, urban networks, and systems of actors in which knowledge, spaces, services, materials, energy, and water are co-managed according to different configurations. The relevance to SDG 9 and SDG 10 lies in the possibility of transforming circularity into a social infrastructure capable of generating value, inclusion, and new forms of dwelling. Synergies with sustainable cities and responsible consumption (SDGs 11 and 12) emerge from the relationship among spatial configurations, management arrangements, and access to resources. The trade-off concerns the distribution of decision-making power within sharing systems, because a shared resource is not automatically equitable if access rights, responsibilities, costs, and benefits are not clear. The conceptual, analytical, and design actions developed by the authors, applied to European cases to identify open, hybrid, or closed models of resource sharing, make transferable categories useful for reading different experiences without reducing them to a single model (Khadim et alii, 2022).

From the urban system, the focus of the volume shifts to that of the building and dwelling, where inequalities do not appear only as distance from services or different exposure to environmental risks, but above all as spatial rigidity, poor performance, access difficulties, limited capacity for transformation, and managerial fragility. At this scale, the relationship between innovation and inclusion becomes especially concrete: a building can accommodate different practices of use, adapt over time, and reduce conditions of exclusion or, conversely, consolidate physical and organisational constraints that make it more difficult to inhabit, care for, maintain, and share. Germanà and Madonia (2026) address this node by assuming adaptability and inclusion as mutually constitutive dimensions of built-environment design. The contribution is situated within the field of Technological and Environmental Design in Architecture and interprets spatial inequalities as tangible manifestations of broader social, economic, and cultural processes. The declared synergies concern poverty, reduce inequalities, sustainable cities, and responsible consumption (SDGs 1, 10, 11, and 12), while the relationship with SDG 9 emerges in the centrality attributed to the technological culture of the built environment as an instrument for reducing material barriers. The trade-off concerns the risk that spatial flexibility, when not supported by affordability, management rules, and participation, may transfer responsibility for transformation onto inhabitants. Through a theoretical reflection and the comparison among the Quinta Monroy case study, the transformation of 530 dwellings at Grand Parc in Bordeaux, and the La Borda cooperative in Barcelona, the authors' conceptual, comparative, and evaluative actions make transferable an interpretative model applicable to different housing contexts, provided that constructive adaptability, affordability, management rules, and user participation are considered jointly (Askar, Bragança, and Gervásio, 2021).

Paris and Vannini (2026) bring the reflection into Rome's public housing stock (Edilizia Residenziale Pubblica, ERP) built through industrialised processes and prefabricated components, treating digital tools as an infrastructure of knowledge rather than as a simple tool of representation. The contribution works at the scale of the building, building systems, and components, while maintaining a constant relationship with the social and urban dimension of public housing estates on the urban periphery. The link with SDG 9 and SDG 10 is direct, because innovating ERP heritage means providing instruments capable of guiding technical and managerial choices without increasing the vulnerability of inhabitants. Synergies with affordable and clean energy and sustainable cities (SDGs 7 and 11) emerge from the possibility of improving comfort, performance, accessibility, and the quality of shared spaces, while the main trade-off concerns the need to balance performance, costs, duration of construction works, residents' continued occupation, and the managerial capacity of the owning bodies. From this perspective, the Digital Atlas, the decision matrix, and the operational abacus constitute knowledge-based, design, and decision-making actions that render the critical issues legible, margins for transformation, priorities, and trade-offs of interventions, with particular attention to the 'soft parts' of dwelling. The transferability of the method derives from decomposition by systems, subsystems, components, and nodes, adaptable to other industrialised public housing stocks and useful for orienting incremental, reversible transformations compatible with the continuity of use of inhabited buildings.

19
2026
AGATHÓN
International Journal
of Architecture, Art and Design

ISSN print: 2464-9309 – ISSN online: 2532-683X

From dwelling systems, the sequence then moves to the scale of the envelope, technical systems, and building components, where innovation assumes a more directly constructive and measurable form. It is at this threshold that SDG 9 and SDG 10 confront a decisive node: transforming the existing building stock, improving environmental performance, and making advanced solutions industrialisable without producing new gaps in cost, competence, and access. The envelope is no longer merely an enclosure or climatic interface, but becomes a device of mediation among matter, production, maintenance, comfort, decarbonisation, and spatial quality. Paoletti et alii (2026) address this passage by proposing the Nature-based Retrofit System (NoRS), a bio-based prefabricated system for the energy retrofit of existing buildings. The contribution places the decarbonisation of the building stock within a life-cycle perspective, recalling that the reduction of operational consumption is not sufficient if embodied carbon, end-of-life scenarios, and the temporal distribution of emissions are not considered. Its relevance to SDG 9 concerns the construction of a replicable decision-support framework for industrialising low-carbon retrofit interventions. Synergies with sustainable cities, responsible consumption, and climate action (SDGs 11, 12, and 13) derive from the possibility of connecting energy performance, circularity, and the selective management of components, while the main trade-off concerns the fact that the benefits of bio-based materials are not automatic and depend on biomass regeneration, end-of-life chains, delayed emissions, and the capacity to assess impacts over time. The authors' design, technological, evaluative, and regulatory actions, based on lightweight prefabrication, dry assembly, principles of design for manufacture, assembly, and disassembly, bio-based materials, and dynamic life-cycle assessment, make transferable not a single product, but a comparative framework applicable to other retrofit systems (Levasseur et alii, 2010).

Romano and Mazzoni (2026) bring the theme of the envelope into the dimension of fine-grained urban regeneration, interpreting the vegetated façade as an ecological, educational, and technological infrastructure. The Urban Bloomers project experiments with Tech-NbS systems 3D printed in clay through additive manufacturing and co-designed with school communities, researchers, companies, and institutional actors, taking the recreational spaces of schools in Florence as urban micro-laboratories. The contribution activates synergies with quality education, innovation, climate action, and life on land (SDGs 4, 9, 13, and 15), showing how a façade component can become an opportunity for environmental learning and biophilic regeneration at the scale of the school space, the neighbourhood, and the urban green network. The trade-off concerns the technological maturation of the system, which requires monitoring over time, verification of durability, environmental assessments, and cost control before moving reliably from prototype to widespread urban application. The experimental, participatory, educational, and monitoring actions, constructed through biodiversity observation, plant-species selection, parametric modelling, prototyping, and in situ verification, make transferable the combination of participation, biological validation, and additive manufacturing to other Mediterranean school contexts (Snep et alii, 2020). A second contribution by Paoletti et alii (2026) narrows the scale further to the façade macro-component, examining technology transfer from the automotive sector to the construction sector as a lever for governing the complexity of the contemporary envelope. The relationship with SDG 9 is direct: the contribution shows how the industrialisation of complexity can improve material efficiency, process control, and construction quality. Synergies with sustainable cities and responsible consumption (SDGs 11 and 12) emerge in mass reduction, in greater coherence between design and production, and in readiness for maintenance and disassembly. The trade-off concerns the relationship between standardisation and architectural specificity: transferring industrial logics does not mean imposing uniformity, but constructing process rules capable of supporting variability, performance, and impact reduction without increasing fragmentation and dependence on specialist expertise. The design, engineering, production, and evaluative actions, based on parametric modelling, topological optimisation, structural verification, and life-cycle analysis, make transferable a progressive protocol for component development, adaptable to other building systems provided that interfaces, control criteria, and validation steps are defined (Laghi, Savino and Gasparini, 2025).

The passage from building technologies to production systems and supply chains shows that the transition is not exhausted in the quality of an individual artefact, but depends on the organisation of processes, data availability, competences, and the distribution of value along supply chains that are often fragmented. At this scale, SDG 9 concerns the capacity to update industrial, energy, and logistical systems, while SDG 10 requires verification of whether this updating is also accessible to less well-structured companies, peripheral territories, and production communities that risk remaining at the margins of innovation. Losco, Pasqualini, and Khodaparast (2026) address this node by proposing a methodological framework for jointly evaluating energy performance and circularity in industrial systems, and present the application case of a large agri-food company's plant, taken as a field for testing energy-efficiency and renewable self-production interventions. The relationship with SDG 9 is direct, since the contribution proposes tools for modernising industry and making it more efficient. Synergies with clean energy, responsible consumption, and climate action (SDGs 7, 12, and 13) derive from reduced consumption and from the greater capacity to control processes. The trade-off concerns SDG 10: digital systems, fine-grained monitoring, and specialist competences can increase the gap between large companies and SMEs if they are not accompanied by accessible tools and support policies. The authors' technical, managerial, and evaluative actions, which integrate energy diagnosis, circularity measurement, digital monitoring of energy carriers, and dynamic simulation, make transferable a method adaptable also to production contexts with fewer technical resources, provided that the industrial transition does not remain the prerogative of already competitive actors (European Commission, 2019).

The contribution by Pietroni et alii (2026) shifts attention from the single plant to the Made in Italy wood-furniture sector, interpreted as an identity-based manufacturing system, rooted in districts and now challenged by the twin ecological and digital transition. The analysis of company cases shows that supply-chain digitalisation, the Digital Product Passport, life-cycle assessment, material traceability, and ecode-

19
2026
AGATHÓN
International Journal
of Architecture, Art and Design

ISSN print: 2464-9309 – ISSN online: 2532-683X

sign strategies can support more circular models, but only if they are integrated with the production culture and organisational capacities of companies. Synergies involve decent work, responsible consumption, and climate action (SDGs 8, 12, and 13), while the relationship with SDG 10 emerges in the risk that the twin transition may increase the gap between companies able to invest in digital tools and small production enterprises lacking adequate economic resources and competences. The trade-off is therefore internal to the transformation of the sector itself: digital innovation and circularity can strengthen competitiveness and sustainability, but they can also select the best-prepared actors and weaken less well-structured companies. The interpretative and guiding actions developed by the authors, referring to the sectoral, district, and product scale, make transferable a reading applicable to other manufacturing districts with a high craft intensity, in which innovation, continuity of know-how, durability, disassembly, and upgradability must be governed together (Antikainen, Uusitalo and Kivikytö-Reponen, 2018).

A first contribution by Ayala-Garcia et alii (2026) extends the discussion to the agri-industrial supply chains of South Tyrol, where by-products from the dairy, brewing, fruit-distillation, and sheep-farming sectors are analysed as secondary material resources. Whey, spent grain, apricot kernels, and local wool are examined from material, technological, and systemic perspectives, with the aim of identifying valorisation pathways consistent with local supply chains. The contribution links SDG 9 to the capacity to develop innovation from underused resources, and SDG 10 to the possibility of redistributing value towards local networks of producers, researchers, and companies. The synergy with responsible consumption (SDG 12) is particularly evident, because the research shows how waste becomes a resource only when infrastructures for collection, transformation, collaboration, and market access exist. The trade-off concerns the distance between material potential and actual feasibility, often conditioned by regulations, treatment costs, available volumes, and the continuity of relations among actors. From this perspective, actions of mapping, residual-flow investigation, material experimentation, and assessment of regulatory and economic conditions make transferable a method applicable to other territories characterised by short supply chains and recurrent by-products. The second contribution by Ayala-Garcia et alii (2026) further narrows the scale to the cashew supply chain in the Colombian Vichada, where infrastructural deficits, self-produced tools, and limited technological availability affect safety, productivity, and value distribution. The Jurui project connects SDG 9 and SDG 10 directly, because it shows how innovation can emerge from the adaptation of everyday tools rather than from the replacement of local practices with imported technologies. Synergies with decent work and responsible consumption (SDGs 8 and 12) emerge in the reduction of risks for operators and in the valorisation of residues. The trade-off concerns scalability, because every technical improvement must remain compatible with the resources, maintenance, knowledge, and economic conditions of the productive community. The actions of direct observation, co-design, material experimentation, and technical validation make transferable not the container itself, but a person-centred design method in which the container becomes a point of connection among ergonomics, safety, material flows, preservation of the raw material, and strengthening of local competences (Bull and Banik, 2025).

A further shift in scale leads to services and interfaces, where innovation is evaluated in its capacity to orient practices of use, safety, learning, and accessibility. At this scale, SDG 9 and SDG 10 become operational conditions: the product becomes a platform of relations among users, services, data, and contexts of use, in which the interface does not merely provide information, but organises decisions, responsibilities, and margins of autonomy. The contribution by Rinaldi and Lagrimino (2026) addresses urban micromobility by taking modularity as a lever for connecting personal mobility and proximity logistics. Starting from a reconfigurable light vehicle developed within the framework of the National Centre for Sustainable Mobility, the research constructs an interpretative model based on recurring factors in micromobility systems and proposes a scenario of hybrid professional micromobility. Synergies with sustainable cities, responsible consumption, and climate action (SDGs 11, 12, and 13) are evident in the reduction of dependence on motorised transport and in the possibility of reconfiguring lower-impact urban services. The trade-off concerns the risk that the flexibility of the vehicle remains a technical possibility if it is not supported by safe infrastructures, affordability, and urban policies capable of truly integrating everyday mobility and light logistics. The authors' analytical, design, and strategic actions, referring to the scale of the product-object and the urban service, make the modular logic transferable to contexts with different densities, cycle infrastructures, and management models, provided that bicycle, cargo bike, platform of use, fleet management, and relations with public transport are considered as parts of a single urban system.

With Zignego et alii (2026), attention shifts from the mobile object to the training interface in domains critical to safety. The On Watch case and the Designer-in-the-Loop framework introduce Human State Monitoring Systems into maritime training as instruments supporting final debriefing, learning from errors, and a culture of safety. The contribution connects SDG 9 and SDG 10 with quality education and decent work (SDGs 4 and 8), because digital innovation can improve preparation in highly critical contexts only if it avoids turning into surveillance or automated ranking. The main trade-off is explicit: the more monitoring capabilities increase, the more necessary it becomes to design limits of use, responsibilities, and safeguards against distortions and inequalities. The design, evaluative, educational, and data-governance actions, with technical-operational and socio-distributive indicators intended to verify usefulness, acceptability, data quality, and risks of misuse, make the method transferable to other safety domains, provided that the design constraints are clear: data minimisation, consent, separation of identifying information, human control, and ex ante and ex post evaluation. Oppedisano, Rossi, and Scortichini (2026) close this scalar passage by focusing on the school classroom as an environment in which object, space, and digital infrastructure converge in emergency preparedness. The Immersive Learning Environment developed for the Life Saving Furniture System integrates virtual reality, content, augmented reality, and the static digital twin of the classroom in order to make life-saving furniture, actions, and procedures during a seismic event

19
2026
AGATHÓN
International Journal
of Architecture, Art and Design

ISSN print: 2464-9309 – ISSN online: 2532-683X

clearer and more actionable. The synergies involve quality education, innovation, reduce inequalities, and sustainable cities (SDGs 4, 9, 10, and 11), because school safety depends not only on structural performance, but on the capacity of users to recognise and correctly use the available devices. The trade-off consists in ensuring that immersive learning does not become an additional layer separated from the project, but an integrated component of innovation itself. The design, educational, experimental, and evaluative actions, structured within the physical-virtual-physical cycle, make the approach transferable to schools and other collective environments in risk areas, provided that costs, technological accessibility, content maintenance, and operator training are addressed.

The scalar sequence then reaches surface and matter, where innovation becomes verifiable in the relationship among geometry, perception, material behaviour, and fabrication processes. At this level, SDG 9 no longer concerns only extensive infrastructures or production systems, but the capacity to govern the technical and sensory quality of components. The associated SDGs, by contrast, call attention to the control of impacts, the responsible use of resources, durability, and the possibility of transferring knowledge without impoverishing the contexts that generate it. The contribution by Alfarano, Spennato, and Filieri (2026) interprets surfaces as design infrastructures able to integrate geometric configuration, additive manufacturing, and the perceptual quality of space. The scale is that of the surface module, but the implications concern the interior environment, architecture, and the production processes of Industry 5.0: through parametric modelling and 3D-printing-based prototyping, the authors verify how controlled variations in geometry, density, and seriality can generate differentiated visual and spatial effects. The contribution links SDG 9 to the possibility of governing geometric complexity and translating it into a flexible production system, while synergies with sustainable cities and responsible consumption (SDGs 11 and 12) emerge from the design of reconfigurable surfaces, adaptable to different contexts of use and potentially integrated into processes of transformation of the built environment. This potential, however, requires critical verification, since modularity and additive manufacturing do not automatically produce environmental benefits: the materials used, energy consumption, production times, durability, and end-of-life scenarios remain decisive variables to be assessed throughout the entire life cycle. From this perspective, the experimental, design, and evaluative actions developed by the authors are not limited to the production of prototypes, but interrogate the conditions of replicability, adaptability, and sustainability of surface systems. For this reason, the transferability of the method lies in the sequence that connects parametric generation, additive fabrication, prototyping, and critical observation of results (Gibson et alii, 2021).

Suksikarn (2026) closes the sequence at the scale of matter and product by analysing ‘yan-lipao’, a traditional material from southern Thailand, as a resource capable of connecting bio-based materials, craft knowledge, and industrial design. The contribution proposes a framework for hybrid innovation between craft and industry, and verifies it through a material-driven co-creative design process that combines documentation of traditional techniques, mechanical characterisation, workshops with students and craftspeople, digital modelling, and prototype production. Here, SDG 9 refers to the capacity to integrate local knowledge and contemporary design tools within more sustainable production processes. Synergies with decent work, responsible consumption and production, and climate action (SDGs 8, 12, and 13) derive from the valorisation of local renewable materials, collaboration with craftspeople, and the hypothesis of supply chains more deeply rooted in their contexts. The trade-off concerns the risk of transforming craft knowledge into an extractive resource or a purely formal repertoire. For this reason, the actions of documentation, material testing, educational experimentation, modelling, and prototyping become transferable only if they maintain an effective relationship with the communities of practice that know, work, and transmit that material. Reproducing ‘yan-lipao’ elsewhere is therefore not the objective; rather, the objective is the method through which local material knowledge can be documented, tested, reinterpreted, and translated into contemporary products without losing its cultural and productive rootedness (Karana et alii, 2015).

The articles published in Volume 19 therefore confirm the need to understand design as a critical infrastructure of the transition: an instrument able to connect knowledge and action, evaluation and decision, and innovation and spatial justice. The impact of the contributions should not be sought in any claim to offer definitive solutions, but in their capacity to provide languages, methods, and criteria with which to orient more informed choices. Acting at different scales with multiscalar effects means accepting that every intervention, even a minimal one, participates in broader systems of resources, rights, competences, and responsibilities. On the basis of this awareness that the design disciplines can contribute to the 2030 Agenda as a place of scientific, cultural, and operational mediation, in which innovation becomes credible when it reduces gaps, strengthens capacities, and makes the transformation of the built environment more equitable.

The framework that emerges is not exhaustive, however, and precisely for this reason retains open scientific significance: many experiments require long-term verification, more robust databases, broader international comparisons, and ex post evaluations capable of measuring not only declared performances, but also actual effects on communities, users, workers, and territories. Some contributions clearly show that innovation itself can generate inclusion or new inequalities: digital tools and information passports can enable circularity, but also accentuate competence divides; nature-based solutions can reduce emissions, but also displace criticalities onto supply chains; urban and territorial regeneration can produce public value or feed extractive processes; and monitoring devices and artificial intelligence can support learning and safety or introduce forms of surveillance. The maturity of the published contributions lies in not concealing these tensions and in making them part of the design argument. Seen in this way, the volume offers useful indications for scientific communities, designers, public administrations, companies, heritage and infrastructure managers, education and training institutions, and third-sector ac-

19
2026
AGATHÓN
International Journal
of Architecture, Art and Design

ISSN print: 2464-9309 – ISSN online: 2532-683X

tors. For researchers, it provides analytical frameworks to make synergies and trade-offs among Goals more verifiable; for designers, it suggests criteria for integrating environmental performance, accessibility, usability, maintenance, and social quality; for public decision-makers, it indicates the need to move from episodic interventions to programmes capable of combining data, governance, economic resources, and responsibility over time; and for companies and supply chains, it proposes a reading of innovation not limited to efficiency, but extended to traceability, durability, circularity, and the distribution of benefits. From this perspective, the contributions advance the debate on themes central to the design disciplines: infrastructures as systems of equity, the digital transition as a question of access and control, regeneration as a long-term process, materials as nodes in social and environmental supply chains, and technologies as devices to be governed rather than merely applied. Taken together, the contributions collected in the volume show that design action oriented towards SDG 9 and SDG 10 cannot be confined to a single scale or a single disciplinary field. Innovation becomes relevant when it produces measurable and recognisable effects at different scales: a decision on carbon or soil modifies planning priorities; the reuse of a building can influence territorial economies and care networks; a façade, a component, or a material can orient supply chains, maintenance, and life cycles; and an interface or learning environment can redefine accessibility, safety, and user responsibilities. The value of the volume lies precisely in this multiscalar reading through a set of conceptual devices, methods, prototypes, and evaluative tools that help us understand how specific decisions can generate systemic repercussions and how general strategies require operational verification in places, buildings, products, and materials.

References

Alfarano, G., Spennato, A. and Filieri, J. (2026), "Superfici come infrastrutture – Design e manifattura additiva nell'Industria 5.0 | Surfaces as infrastructure – Design and additive manufacturing in Industry 5.0", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 19, pp. 498-515. [Online] Available at: doi.org/10.69143/2464-9309/19292026 [Accessed 30 June 2026].

Amin, A. (2014), "Lively Infrastructure", in *Theory, Culture & Society*, vol. 31, issue 7-8, pp. 137-161. [Online] Available at: doi.org/10.1177/0263276414548490 [Accessed 30 June 2026].

Antikainen, M., Uusitalo, T. and Kivikytö-Reponen, P. (2018), "Digitalisation as an Enabler of Circular Economy", in Sakao, T., Lindahl, M., Liu, Y. and Dalhammar, C. (eds), *10th CIRP Conference on Industrial Product-Service Systems (IPS2 2018), Linköping, Sweden, May 29-31, 2018*, Procedia CIRP, vol. 73, Elsevier B.V., Amsterdam, pp. 45-49. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.procir.2018.04.027 [Accessed 30 June 2026].

Askar, R., Bragança, L. and Gervásio, H. (2021), "Adaptability of Buildings – A Critical Review on the Concept Evolution", in *Applied Sciences*, vol. 11, issue 10, article 4483, pp. 1-32. [Online] Available at: doi.org/10.3390/app11104483 [Accessed 30 June 2026].

Augustiniok, N., Houbart, C., Plevoets, B. and Van Cleempoel, K. (2025), "Adaptive reuse of built heritage – Conserving and designing with values", in *Journal of Cultural Heritage Management and Sustainable Development*, vol. 15, issue 1, pp. 24-41. [Online] Available at: doi.org/10.1108/JCHMSD-05-2023-0068 [Accessed 30 June 2026].

Ayala-Garcia, C., Paul, N. R., Bordini, L., Stepanovic, M. and Cohen, N. (2026), "Valorizzazione di materiali residui nelle filiere produttive agro-industriali – Transizioni circolari in Alto Adige (Italia) | Valorisation of residual materials in agro-industrial production chains – Circular transitions in South Tyrol (Italy)", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 19, pp. 416-431. [Online] Available at: doi.org/10.69143/2464-9309/19242026 [Accessed 30 June 2026].

Ayala-Garcia, C., Perez Rodriguez, C., Forero Lesmes, C. L., Cruz Perea, T., Porras, J. S., Maranon, A., Hernandez Acevedo, C., Álvarez Solano, O. and Porras Holguín, A. (2026), "Anacardo circolare – Progetto centrato sulle persone per filiere circolari di produzione dell'anacardio | Cashew in-cycle – Human-centred design for circular cashew production chains", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 19, pp. 432-449. [Online] Available at: doi.org/10.69143/2464-9309/19252026 [Accessed 30 June 2026].

Babacan Demirel, A. and Çınar Çıtak, C. (2026), "Passaporti dell'edificio e dei materiali come infrastrutture sociotecniche per l'economia circolare e l'equità | Building and material passports as socio-technical infrastructures for the circular economy and equity", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 19, pp. 294-309. [Online] Available at: doi.org/10.69143/2464-9309/19172026 [Accessed 30 June 2026].

Barelles-Vicente, E., Torner-Feltrer, M. E., Llinares Millán, J. and Oliver-Faubel, I. (2026), "Riuso adattivo come infrastruttura territoriale per le aree rurali – Valutazione con indicatori per il riuso a Moya (Spagna) | Adaptive reuse as territorial infrastructure for rural areas – Indicator-based evaluation of reuse in Moya (Spain)", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 19, pp. 118-133. [Online] Available at: doi.org/10.69143/2464-9309/1972026 [Accessed 30 June 2026].

Barquet, K., Järnberg, L., Alva, I. L. and Weitz, N. (2022), "Exploring mechanisms for systemic thinking in decision-making through three country applications of SDG Synergies", in *Sustainability Science*, vol. 17, issue 4, pp. 1557-1572. [Online] Available at: doi.org/10.1007/s11625-021-01045-3 [Accessed 30 June 2026].

Bellato, L. and Pollock, A. (2025), "Regenerative tourism – A state-of-the-art review", in *Tourism Geographies | An International Journal of Tourism Space, Place and Environment*, vol. 27, issue 3-4, pp. 558-567. [Online] Available at: doi.org/10.1080/14616688.2023.2294366 [Accessed 30 June 2026].

Bonini Lessing, E., Bosco, A., Ciaramitaro, M. and Pavlov, G. (2026), "Design per il turismo rigenerativo – Musei, alleanze territoriali e rafforzamento delle competenze | Design for regenerative tourism – Museums, territorial alliances, and capacity building", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 19, pp. 400-415. [Online] Available at: doi.org/10.69143/2464-9309/19232026 [Accessed 30 June 2026].

Bruno, D., Palmieri, S., Palomba, R., D'Alessandro, F. and Bisson, M. (2024), "Infrastrutture di mobilità intelligenti e sostenibili – Un nuovo sistema di connessioni urbane | Smart and sustainable mobility infrastructure – A new system of urban connections", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 15, pp. 286-295. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/15232024 [Accessed 30 June 2026].

Buchholz, M. and Lützkendorf, T. (2023), "Building passports and material passports as enablers of circular eco-

19
2026
AGATHÓN
International Journal
of Architecture, Art and Design

ISSN print: 2464-9309 – ISSN online: 2532-683X

nomy in the built environment", in *IOP Conference Series – Earth and Environmental Science*, vol. 1196, article 012074, pp. 1-10. [Online] Available at: doi.org/10.1088/1755-1315/1196/1/012074 [Accessed 30 June 2026].

Bull, B. and Banik, D. (2025), "The Rebirth of the Global South – Geopolitics, Imageries and Developmental Realities", in *Forum for Development Studies*, vol. 52, issue 2, pp. 195-214. [Online] Available at: doi.org/10.1080/08039410.2025.2490696 [Accessed 30 June 2026].

Canina, M. and Efremenko, T. (2026), "Co-creare futuri sostenibili – Il MUSAE Factory model per un'innovazione con arte e tecnologia orientata agli SDG | Co-creating sustainable futures – The MUSAE Factory Model for SDG-oriented innovation through art and technology", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 19, pp. 346-367. [Online] Available at: doi.org/10.69143/2464-9309/19202026 [Accessed 30 June 2026].

Dorfles, G. (1972), *Il disegno industriale e la sua estetica*, Cappelli, Bologna.

European Commission (2023), *Better Regulation – Toolbox 2023*. [Online] Available at: commission.europa. eu/document/download/9c8d2189-8abd-4f29-84e9-abc843cc68e0_en?filename=BR%20toolbox%20-%20Jul%202023%20-%20FINAL.pdf [Accessed 30 June 2026].

European Commission (2021), *Industry 5.0 – Towards a sustainable, human-centric and resilient European industry*, Publications Office of the European Union, Luxembourg. [Online] Available at: doi.org/10.2777/308407 [Accessed 30 June 2026].

European Commission (2019), *Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions – The European Green Deal*, document 52019DC0640, COM/2019/640 final. [Online] Available at: eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52019DC0640 [Accessed 30 June 2026].

Galindo-Rueda, F. and Millot, V. (2015), "Measuring Design and its Role in Innovation", in *OECD Science, Technology and Industry Working Papers*, vol. 01, pp. 1-51. [Online] Available at: doi.org/10.1787/5js7p6lj6zq6-en [Accessed 30 June 2026].

Germanà, M. L. and Madonia, G. (2026), "Adattabilità e inclusione – Strategie contro le disuguaglianze | Adaptability and inclusion – Strategies to reduce inequality in the built environment", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 19, pp. 68-81. [Online] Available at: doi.org/10.69143/2464-9309/1942026 [Accessed 30 June 2026].

Gibson, I., Rosen, D., Stucker, B. and Khorasani, M. (2021), *Additive manufacturing technologies*, Springer, Cham. [Online] Available at: doi.org/10.1007/978-3-030-56127-7 [Accessed 30 June 2026].

IGS – Independent Group of Scientists appointed by the Secretary-General (2023), *Times of crisis, times of change – Science for accelerating transformations to sustainable development – Global Sustainable Development Report 2023*, United Nations, New York. [Online] Available at: sdgs.un.org/sites/default/files/2023-09/FINAL%20GSDR%202023-Digital%20-110923_1.pdf [Accessed 30 June 2026].

Ingaramo, M. O., Chiara, E. C. C., Leme Fleury, A. and Stamatopoulos, C. H. (2026), "Design e ricerca attiva per gli SDG – Ecosistemi di innovazione sostenibile | Design and active research for SDGs – Ecosystems of sustainable innovation", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 19, pp. 382-399. [Online] Available at: doi.org/10.69143/2464-9309/19222026 [Accessed 30 June 2026].

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change (2023), *Climate Change 2022 – Impacts, Adaptation and Vulnerability – Working Group II Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge. [Online] Available at: doi.org/10.1017/9781009325844 [Accessed 30 June 2026].

Karana, E., Barati, B., Rognoli, V. and Zeeuw van der Laan, A. (2015), "Material Driven Design (MDD) – A method to design for material experiences", in *International Journal of Design*, vol. 9, issue 2, pp. 35-54. [Online] Available at: ijdesign.org/index.php/IJDesign/article/view/1965 [Accessed 30 June 2026].

Khadim, N., Agliata, R., Marino, A., Thaheem, M. J. and Mollo, L. (2022), "Critical review of nano and micro-level building circularity indicators and frameworks", in *Journal of Cleaner Production*, vol. 357, article 131859, pp. 1-14. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131859 [Accessed 30 June 2026].

Kostetckaia, M. and Hametner, M. (2022), "How Sustainable Development Goals interlinkages influence European Union countries' progress towards the 2030 Agenda", in *Sustainable Development*, vol. 30, issue 5, pp. 916-926. [Online] Available at: doi.org/10.1002/sd.2290 [Accessed 30 June 2026].

Laghi, V., Savino, E. and Gasparini, G. (2025), "Reduction of the environmental impact of complex-shaped steel joints through topology optimization and large-scale metal 3D printing", in *Results in Engineering*, vol. 27, article 105610, pp. 1-14. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.rineng.2025.105610 [Accessed 30 June 2026].

Levasseur, A., Lesage, P., Margni, M., Deschênes, L. and Samson, R. (2010), "Considering time in LCA – Dynamic LCA and its application to global warming impact assessments", in *Environmental Science & Technology*, vol. 44, issue 8, pp. 3169-3174. [Online] Available at: doi.org/10.1021/es9030003 [Accessed 30 June 2026].

Longo, D., Roversi, R., Mercuri, R. and Turillazzi, B. (2026), "Rifugi climatici come infrastrutture urbane adattive – Una rete sistemica per ridurre le disuguaglianze | Climate shelters as adaptive urban infrastructures – A systemic network to reduce inequalities", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 19, pp. 172-191. [Online] Available at: doi.org/10.69143/2464-9309/19102026 [Accessed 30 June 2026].

Losco, G., Pasqualini, C. and Khodaparast, M. (2026), "Transizioni interconnesse per la sostenibilità industriale – Strumenti digitali, efficienza energetica e circolarità | Interconnected transitions for industrial sustainability – Digital tools, energy efficiency, and circularity", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 19, pp. 212-227. [Online] Available at: doi.org/10.69143/2464-9309/19122026 [Accessed 30 June 2026].

Lusseau, D. and Mancini, F. (2019), "Income-based variation in Sustainable Development Goal interaction networks", in *Nature Sustainability*, vol. 2, pp. 242-247. [Online] Available at: doi.org/10.1038/s41893-019-0231-4 [Accessed 30 June 2026].

Manzini, E. (2015), *Design, When Everybody Designs – An Introduction to Design for Social Innovation*, The MIT Press, Cambridge (MA).

Moraci, F., Barresi, A., Bova, P. and Trimboli, F. (2026), "Alfabetizzazione sul carbonio e infrastrutture ecosistemiche – Metodo GIS-R per la valutazione climatica | Carbon literacy and ecosystem infrastructures – A GIS-R method for climate assessment", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 19, pp. 82-93. [Online] Available at: doi.org/10.69143/2464-9309/1952026 [Accessed 30 June 2026].

Nguyen, T. H. (2026), "Il patrimonio industriale ad Hanoi – Una valutazione multiscalare per il riuso adattivo di una innovativa infrastruttura urbana | Industrial heritage in Hanoi – A multi-scalar assessment for adaptive reuse and innovative urban infrastructure", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 19, pp. 134-149. [Online] Available at: doi.org/10.69143/2464-9309/1982026 [Accessed 30 June 2026].

Nourrigat, E. (2026), "Ibridazione della professione – Nuove alleanze per un'innovazione infrastrutturale del progetto architettonico | Hybridisation of the profession – New alliances for an infrastructural innovation of the architectural project", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 19, pp. 22-35. [Online] Available at: doi.org/10.69143/2464-9309/1912026 [Accessed 30 June 2026].

OECD – Organisation for Economic Co-operation and Development (2024), *Measuring Distance to the SDG Targets 2024 – The Short and Winding Road to 2030*. [Online] Available at: doi.org/10.1787/8a87a041-en [Accessed 30 June 2026].

OECD – Organisation for Economic Co-operation and Development (2019), *Measuring Distance to the SDG Targets 2019*

19
2026
AGATHÓN
International Journal
of Architecture, Art and Design

ISSN print: 2464-9309 – ISSN online: 2532-683X

– An Assessment of Where OECD Countries Stand. [Online] Available at: doi.org/10.1787/a8caf3fa-en [Accessed 30 June 2026].

Oppedisano, F. O., Rossi, D. and Scortichini, M. (2026), "Apprendimento immersivo per aule resilienti – Infrastruttura digitale per arredi salvavita | Immersive learning for resilient classrooms – Digital infrastructure for life-saving furniture", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 19, pp. 482-497. [Online] Available at: doi.org/10.69143/2464-9309/19282026 [Accessed 30 June 2026].

Paoletti, I. M., Conti, G., Castellano, G. and Pradella, F. (2026), "Trasferimento tecnologico automotive-AEC – Framework DfMA e sistemi di facciata complessi | Automotive-AEC technology transfer – DfMA framework and complex façade systems", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 19, pp. 278-293. [Online] Available at: doi.org/10.69143/2464-9309/19162026 [Accessed 30 June 2026].

Paoletti, I. M., Malighetti, L. E., Pittau, F., Pradella, F. and Castellano G. (2026), "Nature-based Retrofit System – Sistema prefabbricato a base biologica per il retrofit energetico degli edifici | Nature-based Retrofit System – Prefabricated bio-based system for the energy retrofit of buildings", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 19, pp. 262-277. [Online] Available at: doi.org/10.69143/2464-9309/19152026 [Accessed 30 June 2026].

Paris, S. and Vannini, C. (2026), "Parti reversibili dell'abitare – Atlante Digitale per la rigenerazione incrementale dell'Edilizia Residenziale Pubblica | Soft parts of living – Digital Atlas for the incremental regeneration of Public Residential Housing", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 19, pp. 228-245. [Online] Available at: doi.org/10.69143/2464-9309/19132026 [Accessed 30 June 2026].

Pashako, F. and Baboçi, D. (2026), "Scuole come infrastrutture urbane – Pianificazione, redistribuzione e rinnovo dell'infrastruttura scolastica a Tirana | Schools as urban infrastructures – Planning, redistribution, and renewal of school infrastructure in Tirana", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 19, pp. 50-67. [Online] Available at: doi.org/10.69143/2464-9309/1932026 [Accessed 30 June 2026].

Pietroni, L., Galloppo, D., Giannetti V. and Di Flamminio, C. (2026), "Innovazione digitale e circolarità nel settore legno-arredo – Strategie sostenibili per il Made in Italy | Digital innovation and circularity in the wood-furniture sector – Sustainable strategies for Made in Italy", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 19, pp. 368-381. [Online] Available at: doi.org/10.69143/2464-9309/19212026 [Accessed 30 June 2026].

Ricci, M., Battisti, A. and Monardo, B. (2014), *I borghi della salute – Healthy ageing per nuovi progetti di territorio*, Alinea, Firenze.

Rinaldi, A. and Lagrimino, J. (2026), "Biciclette e cargo bike – Modelli ibridi modulari per micromobilità urbana e logistica | Bicycles and cargo bikes – Hybrid modular models for urban micromobility and logistics", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 19, pp. 464-481. [Online] Available at: doi.org/10.69143/2464-9309/19272026 [Accessed 30 June 2026].

Romano, R. and Mazzoni, E. (2026), "Biofilia e rigenerazione urbana – Soluzioni Tech-NbS stampate in 3D per microinterventi resilienti | Biophilia and urban regeneration – 3D-printed Tech-NbS for resilient micro-interventions", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 19, pp. 246-261. [Online] Available at: doi.org/10.69143/2464-9309/19142026 [Accessed 30 June 2026].

Russo, D. (2026), "Aesthetic Design e filosofia pratica – Estetica ed etica nel progetto contemporaneo | Aesthetic Design and practical philosophy – Aesthetics and ethics in contemporary design", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 19, pp. 310-331. [Online] Available at: doi.org/10.69143/2464-9309/19182026 [Accessed 30 June 2026].

Snep, R. P. H., Voeten, J. G. W. F., Mol, G. and Van Hattum, T. (2020), "Nature Based Solutions for Urban Resilience – A Distinction Between No-Tech, Low-Tech and High-Tech Solutions", in *Frontiers in Environmental Science*, vol. 8, article 599060, pp. 1-9. [Online] Available at: doi.org/10.3389/fenvs.2020.599060 [Accessed 30 June 2026].

Suksikarn, R. (2026), "Progettare con lo yan-lipao per l'innovazione nell'Industria 5.0 | Designing with yan-lipao for innovation in Industry 5.0", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 19, pp. 450-463. [Online] Available at: doi.org/10.69143/2464-9309/19262026 [Accessed 30 June 2026].

Talamo, C., Huanca Coacalla, N., Atta, N. and Paganin, G. (2026), "Ecosistemi socio-circolari – Innovazione sociale, strategie circolari e ambiente costruito | Socio-circular ecosystems – Social innovation, circular strategies, and the built environment", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 19, pp. 192-211. [Online] Available at: doi.org/10.69143/2464-9309/19112026 [Accessed 30 June 2026].

Tamborrini, P., Russo, D. and Marino, C. (2026), "Il design come infrastruttura relazionale – Università, territori e trasformazioni sistemiche | Design as relational infrastructure – Universities, territories, and systemic transformations", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 19, pp. 332-345. [Online] Available at: doi.org/10.69143/2464-9309/19192026 [Accessed 30 June 2026].

Tartaglia, A. and Alini, L. (2026), "Infrastrutture tra sostenibilità e necessità – Progettazione ambientale e approccio transcalare | Infrastructure between sustainability and necessity – Environmental design and a trans-scalar approach", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 19, pp. 36-49. [Online] Available at: doi.org/10.69143/2464-9309/1922026 [Accessed 30 June 2026].

Thorne, M. and Duran, P. (2016), "The role that architecture can play in the development agenda", in *devex.com*, 05/05/2016. [Online] Available at: devex.com/news/the-role-that-architecture-can-play-in-the-development-agenda-88124 [Accessed 30 June 2026].

UN – United Nations (2015), *Transforming Our World – The 2030 Agenda for Sustainable Development*. [Online] Available at: sdgs.un.org/2030agenda [Accessed 30 June 2026].

UN-Habitat – United Nations Human Settlements Programme (2022), *Envisaging the Future of Cities – World Cities Report 2022*. [Online] Available at: unhabitat.org/sites/default/files/2022/06/wcr_2022.pdf [Accessed 30 June 2026].

UNESCO (2023), *Urban Heritage for Resilience – Consolidated Results of the Implementation of the 2011 Recommendation on the Historic Urban Landscape*. [Online] Available at: doi.org/10.58337/CFZO9650 [Accessed 30 June 2026].

Vettori, M. P. Battaglia, S., Daprà, F. and Dechamps, A. (2026), "Infrastrutture di prossimità – Metodi e strategie per la rigenerazione dei comparti ferroviari della rete lombarda | Infrastructures for proximity – Methods and strategies for the regeneration of railway station areas in the Lombardy network", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 19, pp. 150-171. [Online] Available at: doi.org/10.69143/2464-9309/1992026 [Accessed 30 June 2026].

Villani, T. and Mezzalana, A. (2026), "Borghi come infrastrutture di cura – Metaprogetto per l'Alzheimer nelle aree interne | Borghi as care infrastructures – A metaproject for Alzheimer's disease in inland areas", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 19, pp. 94-117. [Online] Available at: doi.org/10.69143/2464-9309/1962026 [Accessed 30 June 2026].

Zignego, M. I., Bertirotti, A., Gemelli, P. and Pagani, L. (2026), "Monitoraggio dello stato umano nella formazione marittima – Il caso On Watch | Human state monitoring in maritime training – The On Watch case", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 19, pp. 516-529. [Online] Available at: doi.org/10.69143/2464-9309/19302026 [Accessed 30 June 2026].

AGATHÓN – International Journal of Architecture, Art and Design | n. 19 | 2026 | pp. 22-35
ISSN print: 2464-9309 – ISSN online: 2532-683X | doi.org/10.69143/2464-9309/1912026

ARTICLE INFO

Received	28 February 2026
Revised	05 May 2026
Accepted	10 May 2026
Published	30 June 2026

IBRIDAZIONE DELLA PROFESSIONE
Nuove alleanze per un'innovazione infrastrutturale del progetto architettonico

HYBRIDISATION OF THE PROFESSION
New alliances for an infrastructural innovation of the architectural project

Elodie Nourrigat

ABSTRACT

Il contributo propone una rilettura dell'innovazione nell'architettura a partire dalle trasformazioni contemporanee che coinvolgono le pratiche professionali, sostenendo che l'attuale crisi nella gestione del progetto e nel posizionamento della professione non derivi da un deficit di progresso tecnologico, bensì dalla frammentazione degli assetti procedurali e decisionali. Attraverso un'analisi sistemica delle trasformazioni normative, digitali e istituzionali la ricerca introduce il concetto di 'innovazione infrastrutturale', inteso come riconfigurazione delle strutture cognitive, organizzative e relazionali del progetto. In questa prospettiva le 'nuove alleanze' definiscono le condizioni per un approccio ibrido capace di integrare la complessità, promuovere la transdisciplinarità e trasformare le modalità di produzione architettonica di fronte alle sfide socio-ecologiche.

This contribution proposes a reinterpretation of innovation in architecture through the contemporary transformations affecting professional practices. It argues that the current crisis in the management of the project and in the positioning of the profession does not arise from a deficit of technological progress, but from the fragmentation of procedural and decision-making frameworks. Through a systemic analysis of regulatory, digital, and institutional transformations, the research introduces the concept of 'infrastructural innovation', understood as a reconfiguration of the cognitive, organisational, and relational structures of the architectural project. From this perspective, 'new alliances' define the conditions for a hybrid approach capable of integrating complexity, promoting transdisciplinarity, and transforming the modes of architectural production in response to socio-ecological challenges.

KEYWORDS

innovazione infrastrutturale, ibridazione, progettazione, trasformazione sistemica, riposizionamento professionale

infrastructural innovation, hybridisation, architectural design, systemic transformation, professional repositioning



Elodie Nourrigat, Architect and Doctor HDR, is a Full Professor at the École Nationale Supérieure d'Architecture de Montpellier (France), where she directs the 'Métropoles du Sud' Master's programme. She is an associate researcher at Lab'URBA. Co-founder of NBJ Architectes, she integrates professional practice and academic research. Her work critically analyses contemporary transformations of territories and architectural practices, positioning the project both as an intellectual enquiry and as a constructive act. E-mail: e.nourrigat@nbj-archi.com

Le trasformazioni contemporanee indotte dalla crisi ambientale, dall'accelerazione digitale e da nuovi assetti istituzionali stanno modificando in profondità le condizioni di produzione dell'architettura. In questo contesto l'innovazione è prevalentemente interpretata attraverso una lente tecnologica – prestazione energetica, digitalizzazione dei processi e ottimizzazione dei flussi – mentre gli studi sulle transizioni sistemiche mostrano che il solo progresso tecnico non è sufficiente a generare cambiamenti duraturi. Tali trasformazioni richiedono modificazioni strutturali dei modelli di governance, delle organizzazioni professionali e delle modalità di produzione della conoscenza (Geels, 2002; Loorbach, 2010; Morin, 2015); da questo punto di vista il progetto architettonico costituisce un ambito strategico in cui convergono vincoli normativi, requisiti ambientali, logiche economiche e aspettative sociali.

Il recente dibattito su Industria 5.0 pone l'accento su sistemi centrati sull'uomo, resilienti e sostenibili, capaci di coniugare prestazioni tecnologiche e valori sociali (European Commission, 2021), segnando un nuovo paradigma rilevante: l'innovazione non può più essere concepita soltanto come efficienza tecnica, ma deve essere intesa come trasformazione integrata dei sistemi produttivi e organizzativi; tuttavia nel campo dell'architettura l'innovazione continua spesso a essere valutata attraverso indicatori prestazionali più che come riconfigurazione dei modelli professionali e decisionali.

In questo contesto la crisi contemporanea non riguarda soltanto l'oggetto costruito ma, più radicalmente, la gestione del progetto e il posizionamento stesso della professione. La crescente complessità normativa, la progressiva specializzazione delle competenze e la frammentazione digitale hanno indebolito la capacità di sintesi e di coordinamento del progetto architettonico, redistribuito le responsabilità e reso più instabile l'identità disciplinare; la questione supera dunque l'innovazione tecnica e riguarda la riconfigurazione delle infrastrutture cognitive, organizzative e relazionali che strutturano il progetto architettonico.

L'ipotesi sviluppata nel contributo è che questa condizione abbia origine dalla consapevolezza ambientale maturata tra gli anni Ottanta e Novanta del Novecento quando la progressiva integrazione delle istanze ecologiche nel campo dell'architettura ha determinato l'emergere di nuovi attori specializzati e una ridefinizione delle competenze, mettendo in discussione la centralità storica dell'architetto nei processi decisionali: all'aumento della complessità le discipline del progetto hanno spesso risposto attraverso modelli analitici fondati sulla divisione e sulla specializzazione. Marcel Bolle de Bal (2003) definisce questo processo come 'déliance', mentre Edgar Morin (2004) ne analizza gli effetti all'interno del 'paradigma di semplificazione'. Tale dinamica ha favorito l'iperspecializzazione, contribuito alla frammentazione delle missioni e separato progetto, competenza tecnica e decisione; l'affermazione delle tecnologie digitali e degli strumenti di gestione ha ulteriormente amplificato questa segmentazione. Per analizzare tali trasformazioni l'articolo adotta un approccio sistemico strutturato attorno a tre dimensioni – assetto, metodo e identità / pratiche – al fine di individuare i meccanismi strutturali che alimentano la frammentazione e di esplorare le condizioni per il suo superamento. In questa prospettiva l'innovazione è considerata 'innovazione infrastrutturale', intesa come trasformazione delle condizioni di produzione del progetto e non come semplice miglioramento degli oggetti costruiti.

Al centro di questa mutazione si colloca l'ibridazione, intesa come 'processo di ricomposizione e incremento delle competenze' (Halpern, 2020), che non implica una semplice giustapposizione di discipline bensì una trasformazione attiva dei saperi e dei ruoli. Da tale processo emergono due figure archetipiche: i 'convergenti', orientati a intensificare il controllo tecnico e costruttivo per ridurre l'incertezza, e i 'divergenti' che estendono l'ibridazione ad ambiti adiacenti e assumono l'incertezza come motore del progetto. Queste figure derivano da un medesimo movimento di ampliamento delle pratiche: ciò che la 'déliance' ha prodotto può quindi essere riconfigurato entro una logica di 'reliance' (Morin, 2005), intesa come ricomposizione sistemica dei saperi e degli attori.

L'obiettivo del contributo è identificare tali dinamiche attraverso una lettura critica dello stato attuale della professione e proporre un quadro analitico in grado di ripensarne il riposizionamento. Concettualizzando l'innovazione come infrastrutturale e l'ibridazione come processo operativo, il saggio intende contribuire all'arricchimento delle conoscenze sulla trasformazione sistemica del progetto architettonico e aprire prospettive per alleanze professionali capaci di confrontarsi con la complessità contemporanea.

Ripensare l'innovazione: innovazione sistemica e trasformazione delle pratiche progettuali e professionali | La ricerca contemporanea sull'innovazione ha progressivamente spostato l'analisi da un approccio centrato sulla prestazione tecnica a una comprensione sistemica dei processi di trasformazione. Gli studi sulle transizioni socio-tecniche mostrano che le trasformazioni sostenibili derivano da innovazioni incrementali e da una ricomposizione di assetti istituzionali, attori e strutture cognitive, concependo così l'innovazione come processo multilivello che articola tecnologie, organizzazioni e strutture sociali (Geels, 2002; Schot and Geels, 2008). Gli studi sulla transizione sono stati ulteriormente ampliati da ricerche sulla governance adattiva e sui modelli professionali e gestionali (Loorbach, 2010) che evidenziano come la crescente complessità dei sistemi contemporanei richieda maggiori capacità di integrazione e coordinamento.

Questa prospettiva converge con le riflessioni sul 'pensiero complesso' sviluppate da Morin (2005) secondo il quale la frammentazione dei saperi costituisce un ostacolo decisivo alla comprensione e all'azione in contesti incerti; tale evoluzione si inscrive in uno mutamento più profondo delle modalità con cui il pensiero organizza e affronta la complessità. Già nello scorso secolo Prigogine e Stengers (1979), in La Nouvelle Alliance, invitavano a superare la separazione tra scienze della natura e scienze umane, per integrare incertezza, irreversibilità e interdipendenza nella produzione della conoscenza, chiarendo un passaggio epistemologico determinante: la complessità deve essere affrontata attraverso processi di ricomposizione.

In ambito industriale l'emergere del paradigma di Industria 5.0 riflette questo mutamento: superando una concezione dell'innovazione centrata esclusivamente sulla produttività e sull'automazione, promuove sistemi centrati sull'uomo, resilienti e sostenibili, nei quali prestazioni tecnologiche, responsabilità sociale e capacità adattiva dei processi produttivi sono integrate in un medesimo orizzonte di trasformazione (European Commission, 2021). In tale quadro l'innovazione è intesa come trasformazione integrata dei sistemi produttivi che implica riconfigurazione organizzativa e responsabilità sociale. Queste evoluzioni trovano riscontro nella produzione architettonica contemporanea: gli studi di Harriet Harriss, in particolare Architects After Architecture – Alternative Pathways for Practice (Harriss, Hyde and Marcaccio, 2020) e Architecture's Afterlife – Breaking the Profession that is Breaking the Planet[1] (Barosio et alii, 2024), indagano sulla ridefinizione delle traiettorie professionali di fronte alle crisi ambientali e istituzionali, mettendo in evidenza l'ampliamento dei campi d'intervento e la necessità di superare le tradizionali forme di esercizio della professione.

Nel contesto francese lo studio condotto sotto la direzione di Véronique Biau ed Elise Macaire (2024), nell'ambito dell'appello alla manifestazione d'interesse dal titolo Skills and Professions of the Future dedicato alla filiera dell'Architettura, conferma l'evoluzione delle competenze richieste e la diversificazione dei profili, sottolineando la crescente importanza delle competenze trasversali e la ricomposizione dei percorsi professionali. Le analisi qualitative sono corroborate dai dati quantitativi prodotti annualmente dall'Ordre des Architectes in Archigraphie (Fig. 1) che documentano l'evoluzione delle modalità di esercizio della professione, la diversificazione delle attività, la trasformazione dei modelli economici degli studi e le mutazioni demografiche del settore; tali dati rendono osservabili alcune trasformazioni strutturali in atto: riconfigurazione degli incarichi, crescita delle competenze specialistiche e ampliamento dei perimetri d'intervento.

Nel loro insieme tali contributi attestano una profonda trasformazione del campo architettonico, eppure, nonostante queste evidenze convergenti, l'innovazione in architettura continua a essere analizzata prevalentemente nel dominio della tecnica, attraverso la prestazione energetica, gli strumenti digitali e la sperimentazione materiale. Pur essendo essenziali queste dimensioni non attestano la mutazione delle strutture cognitive, organizzative e decisionali che sostengono il processo progettuale.

Esiste dunque uno scarto tra le trasformazioni che investono la professione, osservabili tramite gli studi di settore e i dati statistici, e l'assenza di una concettualizzazione teorica dell'innovazione quale trasformazione infrastrutturale del progetto architettonico. La letteratura ha ampiamente esplorato l'innovazione tecnologica applicata all'architettura indagando meno l'innovazione come riconfigurazione dei quadri che organizzano la progettazione, il coordinamento tra gli attori e la produzione delle decisioni.

La nozione di 'déliance', proposta da Bolle de Bal (2003), consente di leggere la crescente divisione dei saperi e delle responsabilità: associata al 'paradigma di semplificazione' descritto da Morin (2005) mette in evidenza gli effetti dell'iperspecializzazione sulla capacità di sintesi e di coordinamento della professione. Parallelamente gli studi sull'ibridazione offrono un quadro concettuale per pensare la ricomposizione: l'ibridazione è descritta come un processo di trasformazione fondato sull'intreccio e sull'ampliamento delle competenze, capace di produrre forme organizzative inedite (Halpern, 2020). Tuttavia il nesso tra frammentazione

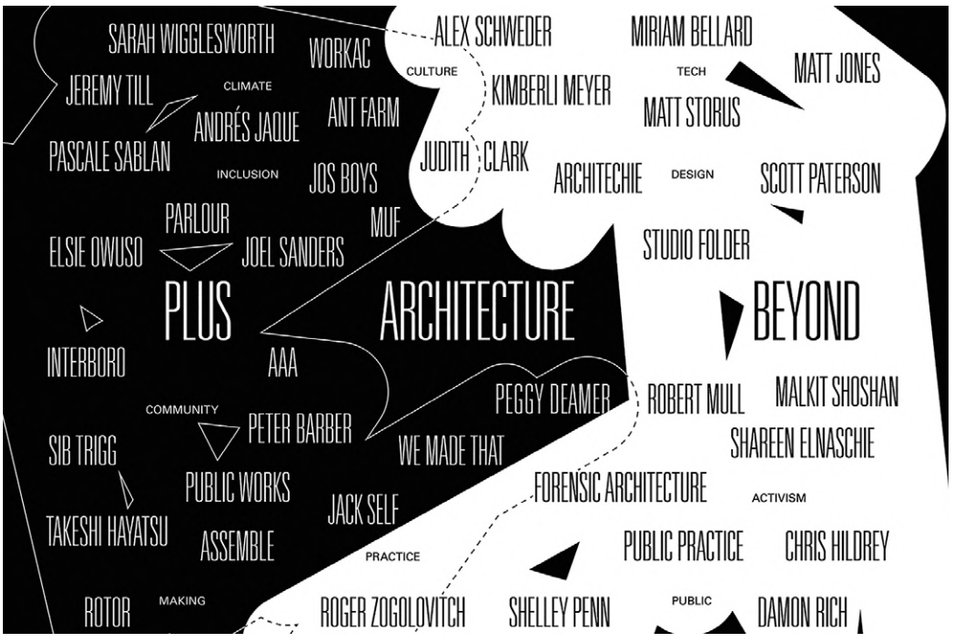


Fig. 1 | A conceptual map of Architects After Architecture shows 'Architecture' at the centre, representing its traditional form. Surrounding this core is PLUS, the ambiguous area where practitioners push the discipline's boundaries from within. 'Beyond' signifies those who have departed from architecture entirely to utilise their expertise in other domains (credit: Studio Folder, 2020).

delle competenze, evoluzione delle strutture cognitive e ibridazione delle pratiche resta ancora insufficientemente articolato nel campo architettonico. È in questo spazio teorico non ancora pienamente esplorato che si colloca il presente saggio, proponendo di concettualizzare l'innovazione architettonica come innovazione infrastrutturale, intesa come trasformazione delle strutture cognitive, organizzative e relazionali del processo progettuale, e di analizzare l'ibridazione come processo centrale di tale ricomposizione.

'Déliance' e frammentazione infrastrutturale: quadro concettuale e condizioni strutturali | L'idea ricorrente che gli architetti versino in una condizione di 'in crisi' accompagna il dibattito disciplinare da diversi decenni. Già alla fine degli anni Novanta Philippe Rahm (Nourrigat, 1999) evocava una professione uscita 'nel pieno di una crisi', mentre Xavier Leibar (Nourrigat, 1999) sottolineava una crisi di natura 'identitaria' più che congiunturale. Nel 2004 un rapporto del Senato francese (Dauge, 2004) menzionava esplicitamente 'la crisi di una professione regolamentata' e più recentemente Susanne Stacher (2023) ha dedicato un volume all'analisi delle risposte e delle strategie adottate dagli architetti di fronte alle crisi.

Questa continuità del dibattito invita a superare l'ipotesi di una fase transitoria e a interrogare le condizioni strutturali di una trasformazione duratura: ciò che emerge non è tanto uno stato di crisi quanto una progressiva contrazione degli incarichi, delle responsabilità e centralità del ruolo riconosciuto agli architetti.

L'ipotesi è che con l'aumento della complessità gli adattamenti messi in atto dagli architetti li conducano sempre più verso la 'déliance' e verso un impoverimento del loro campo d'azione professionale. La lettura proposta assume che l'origine di tale 'déliance' si manifesti con particolare evidenza quando la gestione della complessità diventa centrale nel quadro delle questioni ambientali degli anni Settanta.

Diversi autori hanno posto la necessità di un cambiamento di paradigma nella gestione dei saperi e nei modi di pensiero, mettendo a fuoco il quadro di una complessità ampliata: il rapporto Meadows (Meadows et alii, 1972) introduce una modellizzazione sistemica delle interazioni tra popolazione, risorse e inquinamento, rivelando i limiti fisici della crescita; Hans Jonas (1990) insiste sulla responsabilità connessa all'irreversibilità degli effetti tecnici; Prigogine e Stengers (1979) affermano la necessità di rinnovare un dialogo sperimentale per comprendere meglio l'uomo e la natura. Buckminster Fuller, attraverso la Synergetics, invita a sviluppare un approccio più sistemico per una migliore gestione delle risorse (Buckminster Fuller and Applewhite, 1975); Bruno Latour (2015), a partire dal concetto di Gaia elaborato da Lovelock (2017), richiama la necessità di ripensare l'interdipendenza tra gli esseri umani e i sistemi terrestri (Fig. 2).

Nel campo dell'architettura questa complessità viene tuttavia tradotta soprattutto in dispositivi normativi settoriali, come mostra l'approccio Haute Qualité Environnementale (HQE) che, a partire dal 1996, divide la qualità ambientale in quattordici obiettivi, rendendo evidente il concetto di 'déliance' di Marcel Bolle de Bal (2003): un principio moderno fondato sulla separazione delle funzioni e delle forme di sapere. Edgar Morin (2004) parla, a questo proposito, di 'paradigma di semplificazione', in cui la complessità è affrontata per divisione più che per integrazione. In questo modo il quadro istituzionale e normativo non si limita a definire criteri di qualità ambientale ma consolida una gestione del progetto per ambiti separati, in cui prestazioni, competenze e responsabilità tendono a essere valutate autonomamente anziché ricomposte in una visione progettuale unitaria.

La gestione analitica della complessità | La risposta operativa alla crescente complessità si è progressivamente strutturata attraverso un metodo analitico, fondato sulla scomposizione del progetto in ambiti prestazionali distinti. Gli obiettivi HQE, seguiti dalla proliferazione di protocolli, certificazioni e sistemi di valutazione ambientale – BREEAM, LEED, WELL, E+C- e BDM – restituiscono un approccio in cui le diverse dimensioni della qualità ambientale vengono misurate, verificate e ottimizzate separatamente; in questo scenario, Hudin e Veran (2012) hanno sottolineato la 'urgenza di istituire un linguaggio comune' di fronte alla moltiplicazione dei sistemi di riferimento.

La prestazione tecnica misurabile diventa così il principale criterio di legittimazione del progetto: ogni dimensione viene valutata attraverso indicatori specifici e ricondotta a evidenze quantitative, con il risultato di produrre un'accumulazione di prove tecniche non sempre in grado di restituire la coerenza complessiva dell'intervento. Come ricorda Morin (2015, p. 77), «[…] quantification and compartmentalisation are the enemies of understanding»; la frammentazione metodologica tende quindi a moltiplicare le competenze specialistiche e gli strumenti di verifica, ma non garantisce necessariamente una sintesi progettuale unitaria.

L'affermazione delle tecnologie digitali rafforza questa logica. Il BIM, presentato come strumento che facilita la collaborazione tra competenze diverse, introduce un modello digitale comune e interoperabile ma redistribuisce le responsabilità attraverso la creazione di ruoli specializzati, come quello del BIM manager. L'intelligenza artificiale e il design generativo rafforzano questo approccio: l'algoritmo analizza migliaia di varianti in base a criteri predefiniti per ottimizzare superficie, densità o prestazioni energetiche. La progettazione rischia così di essere ridotta a un problema computazionale da risolvere, mentre il metodo tende a privilegiare l'ottimizzazione parametrica a scapito di una sintesi interpretativa.

Buckminster Fuller (2010) aveva già denunciato gli effetti di una specializzazione eccessiva che limita ogni visione d'insieme; la gestione della complessità attraverso la segmentazione costituisce dunque un metodo efficace per trattare variabili isolate ma insufficiente per pensare le interdipendenze sistemiche.

Identità e pratiche: il restringimento del perimetro professionale | Gli effetti di questo assetto e del metodo analitico che lo sostiene si riflettono direttamente sull'identità professionale dell'architetto. L'aumento delle richieste tecniche, normative e ambientali ha ampliato il numero di competenze coinvolte nel processo progettuale: accanto agli apporti tradizionali – strutture, impianti, economia – i bandi e le procedure di selezione richiedono oggi figure specializzate in ambito ecologico, riuso, assistenza alla committenza e agli utenti, gestione BIM e in altri settori. Questa articolazione rafforza la capacità tecnica del progetto ma rende più complesso il coordinamento tra attori, responsabilità e ambiti decisionali.

Come osserva Véronique Biau (2020) tali trasformazioni modificano la posizione dell'architetto nella catena decisionale e ridefiniscono gli equilibri tra le diverse competenze coinvolte. Storicamente riconosciuto come figura di governo complessivo del progetto – capace di articolare forma, funzioni,

esigenze tecniche, istanze culturali, vincoli economici, procedure amministrative e rapporti con la committenza – l'architetto vede oggi in discussione la propria centralità all'interno di una rete più estesa di saperi specialistici. La sua funzione non scompare ma viene ricollocata in un sistema di coordinamento più distribuito, in cui alcune attività sono esternalizzate, altre frammentate e molte decisioni dipendono dall'interazione tra soggetti diversi. Ne deriva un restringimento del suo perimetro professionale: non solo una riduzione degli incarichi direttamente presidiati ma anche un indebolimento della sua capacità di mantenere una sintesi unitaria tra le componenti del progetto; la padronanza complessiva dell'intervento tende così a lasciare spazio a una gestione segmentata delle responsabilità.

La frammentazione osservata non costituisce dunque un adattamento puntuale ma un fenomeno strutturale; essa deriva da una sequenza cumulativa: la complessità ambientale viene tradotta in dispositivi normativi settoriali; i parametri prestazionali sono gestiti attraverso metodi analitici; le tecnologie digitali introducono nuove forme di tecnicizzazione; l'organizzazione del progetto si articola in competenze sempre più specialistiche. La 'déliance' descritta da Bolle de Bal (2003) si manifesta qui come separazione tra strutture cognitive, assetti organizzativi e relazioni operative del progetto architettonico. Questa osservazione conferma l'ipotesi del contributo: la crisi identitaria contemporanea degli architetti non deriva dal ritardo tecnologico ma da una gestione della complessità fondata sulla separazione più che sull'integrazione; la questione è quindi infrastrutturale: riguarda le condizioni attraverso cui il progetto organizza saperi, responsabilità e decisioni; è questa 'déliance' strutturale a rendere necessaria una ricomposizione.

Dall'incertezza all'ibridazione come innovazione infrastrutturale | In un mondo segnato da instabilità climatica, tensioni geopolitiche e accelerazione tecnologica l'incertezza costituisce una condizione strutturale, eppure una certezza permane: fare architettura, in un modo o nell'altro, significa decidere. Ciò non implica che sia l'architetto a decidere da solo; al contrario affinché il progetto esista è necessaria una decisione: la questione essenziale diventa dunque come decidere in un universo di incertezza.

Ulrich Beck (2008) descrive questa condizione come l'avvento di una 'società del rischio', caratterizzata da minacce globali, invisibili e imprevedibili; Edgar Morin (2000) ricorda, a sua volta, che ogni azione comporta una scommessa, poiché implica consapevolezza del rischio e impossibilità di controllo totale. In questo quadro la ricerca di una soluzione unica appare illusoria, pertanto diventa necessario sostituire l'idea di 'soluzione' con la costruzione di strategie urbane e architettoniche, capaci di orientare l'azione progettuale senza pretendere di eliminare l'incertezza. La strategia d'intervento prevale così sulla semplice risoluzione del problema (Morin, 2020) poiché consente al progetto di adattarsi a condizioni mutevoli, integrare variabili diverse e ridefinire progressivamente le proprie scelte. Da qui deriva la necessità di modificare le modalità con cui il progetto organizza e affronta la complessità, aprendo la disciplina a forme più ibride di conoscenza, decisione e azione.

L'ibridazione indica piuttosto un processo attraverso cui saperi, strumenti, ruoli e responsabilità vengono messi in relazione fino a modificare il modo stesso in cui il progetto viene pensato, organizzato e deciso. Gabrielle Halpern (2020) definisce l'ibridazione come una fusione creativa capace di produrre una realtà inedita, distinta dalla semplice giustapposizione di elementi preesistenti.

Questa distinzione è rilevante perché consente di chiarire le differenze tra interdisciplinarità, transdisciplinarità e ibridazione: l'interdisciplinarità mette in dialogo discipline che mantengono riconoscibili i propri confini; la transdisciplinarità, secondo Piaget (1972), tende a costruire un quadro comune entro cui tali discipline possano operare: l'ibridazione compie un passaggio ulteriore, non si limita a coordinare competenze diverse, ma trasforma gli elementi coinvolti, producendo nuove configurazioni operative, nuovi ruoli e nuove modalità di costruzione delle decisioni. In questo senso i confini diventano permeabili e le identità professionali non sono più definite per esclusione ma in base alla capacità di relazione, adattamento e ricomposizione.

Questo passaggio risponde direttamente ai limiti del paradigma di semplificazione analizzato in precedenza. Dove la 'déliance' separa saperi, funzioni e responsabilità, l'ibridazione consente di rimetterli in relazione; ciò che aveva contribuito alla frammentazione del progetto – specializzazione, tecnicizzazione, complessità ambientale e moltiplicazione degli attori – può diventare leva di ricomposizione se integrato in una logica progettuale capace di produrre sintesi. La questione non consiste quindi nel ripristinare la centralità perduta dell'architetto ma nel ridefinire le condizioni attraverso le quali il progetto può coordinare competenze, responsabilità e decisioni in un ambiente complesso.

L'ibridazione costituisce dunque un quadro concettuale per ripensare l'innovazione architettonica: non come semplice miglioramento tecnico ma trasformazione delle strutture cognitive e organizzative attraverso cui il progetto affronta la complessità, costruisce relazioni tra saperi diversi e prende decisioni condivise.

Metodo: reliance sistemica e strategie adattive | L'ibridazione non si limita a una postura teorica ma implica un metodo; di fronte all'incertezza Morin oppone il programma – sequenza rigida adatta a un ambiente stabile – alla strategia, capace di evolvere secondo le circostanze (Morin, 2000). L'innovazione infrastrutturale presuppone proprio questo passaggio dal programmatico allo strategico.

Concepire il progetto come ecosistema rappresenta la traduzione metodologica di tale orientamento. La teoria dei sistemi di von Bertalanffy (2012) e la nozione di ecosistema formulata da Tansley (1935) offrono un modello di organizzazione fondato sull'interdipendenza e sull'adattabilità: un ecosistema non è una somma di elementi ma un insieme dinamico in cui ogni componente interagisce con le altre. Applicata al progetto architettonico questa prospettiva conduce a considerarlo come un sistema complesso aperto, capace di articolare dati ambientali, sociali, tecnici ed economici.

L'ibridazione diventa allora metodo di 'reliance' (Morin, 2004), consente di articolare ambienti distinti – scientifici, tecnologici, culturali, sociali – per produrre strategie adattive, non risposte cristallizzate. Gli strumenti di anticipazione strategica e il 'design fiction' illustrano questo orientamento: la strategia prospettiva anticipatoria non mira a prevedere un futuro unico, ma a elaborare scenari che integrino incertezze e variabili. Il 'design fiction', come sviluppato da Dunne e Raby (2013) o analizzato da Nicolas Nova (2014), propone 'prototipi diegetici' (Kirby, 2010) che materializzano scenari possibili per renderli discutibili (Fig. 3). Il progetto architettonico può divenire un oggetto di discussione di questo tipo, non soluzione definitiva ma ipotesi strategica attraverso cui esplorare, discutere e orientare possibili trasformazioni dello spazio costruito.

L'innovazione infrastrutturale opera dunque attraverso un'ibridazione metodologica: non si limita a risolvere problemi circoscritti ma costruisce capacità di integrazione sistemica e adattamento progressivo; in questo modo modifica le modalità di produzione del progetto, riconoscendo immaginazione progettuale, costruzione di scenari e trasversalità tra saperi come strumenti necessari per orientare le decisioni in condizioni di complessità e incertezza.

Identità e pratiche: l'ampliamento come incremento | L'ibridazione comporta anche una trasformazione identitaria. Halpern (2020) contrappone l'identità esclusiva delle 'o' all'alterità inclusiva delle 'e': l'architetto non è più definito da una funzione unica e rigidamente delimitata ma dalla capacità di mettere in relazione, integrare e ampliare competenze diverse. In questa prospettiva l'identità professionale non si costruisce più per separazione tra ambiti ma attraverso la capacità di attraversarli e ricomporli.

Gli studi di Harriet Harriss, in collaborazione con diversi ricercatori, mostrano che quasi il 40% dei laureati in architettura in Europa e negli Stati Uniti sviluppa percorsi professionali esterni alla pratica tradizionale della progettazione, continuando tuttavia a mobilitare competenze architettoniche (Harriss, Hyde and Marcaccio, 2020). Lungi dal rappresentare un abbandono tali percorsi esprimono un ampliamento delle pratiche. Lo studio condotto da Véronique Biau ed Elise Macaire (2024) conferma questa diversificazione, individuando nuove famiglie di attività che spaziano dalla committenza alla mediazione fino alla ricerca (Figg. 4-6).

Questi sbocchi professionali non indicano una dispersione della disciplina ma un processo di ampliamento delle sue possibilità operative. L'ibridazione arricchisce le competenze di base dell'architetto mettendole in relazione con altri campi del sapere e dell'azione – tecnologia, scienze sociali, cultura e politica – e contribuisce così a costruire un'identità professionale più permeabile, capace di confrontarsi con la complessità anziché irrigidirsi entro confini prestabiliti. Questa dinamica può assumere forme diverse: alcuni architetti tornano a investire nella materialità e nei processi costruttivi, rafforzando la padronanza tecnica del progetto; altri esplorano ambiti contigui, come l'intelligenza artificiale, la biologia o la ricerca sui materiali innovativi; in entrambi i casi l'ibridazione costituisce la matrice comune e agisce come motore di una ricomposizione dei ruoli professionali.

Il passaggio dalla 'déliance' alla 'reliance' avviene dunque attraverso l'ibridazione: ciò che aveva frammentato – specializzazione, diversificazione, apertura – diventa vettore di innovazione quando tali elementi sono integrati entro una dinamica sistemica. L'innovazione infrastrutturale non modifica prioritariamente l'oggetto architettonico ma trasforma le condizioni stesse della sua produzione, riorganizzando quadri, metodi e identità.

È tuttavia da rilevare che se l'ibridazione costituisce la matrice della trasformazione infrastrutturale del progetto architettonico e dell'identità professionale degli architetti, questo processo non conduce tuttavia a un'unica traiettoria ma a due figure archetipiche, qui definite 'convergente' e 'divergente'. Non si tratta di categorie sociologiche rigide né di tipologie alternative e chiuse ma di strumenti interpretativi utili a descrivere due strategie di riposizionamento della professione di fronte alla complessità contemporanea. Entrambe nascono dallo stesso ampliamento delle competenze, orientano però in modo diverso il rapporto tra progetto e incertezza: la figura 'convergente' tende a ridurre l'incertezza rafforzando la padronanza tecnica e costruttiva; la figura 'divergente' tende invece ad assumerla come condizione produttiva, estendendo l'azione dell'architetto verso ambiti collegati all'architettura.

Il 'convergente': l'ibridazione orientata alla padronanza | La figura archetipica del 'convergente' esprime una strategia orientata alla coerenza del progetto e alla padronanza dei processi costruttivi. Di fronte alla frammentazione delle competenze e alla moltiplicazione delle mediazioni tecniche il 'convergente' tende a ricondurre il progetto a un sistema più controllabile, rafforzando il rapporto tra ideazione, decisione e realizzazione. In questo caso l'ibridazione si traduce nel consolidamento del legame tra concezione progettuale e produzione materiale. Nelle sue ricerche Béatrice Durand (2023) definisce le 'mediazioni' come 'oggetti o operazioni intermedie, rapporti di dipendenza o delega'; il 'convergente' cerca di ridurre queste mediazioni per accorciare la catena decisionale e riportare i processi costruttivi nel campo di competenza dell'architetto. Ciò non comporta necessariamente una riduzione della scala dell'intervento, riguarda piuttosto la volontà di diminuire il numero dei passaggi intermedi, degli interlocutori e delle deleghe che separano la fase ideativa da quella realizzativa. In tal modo il processo progettuale viene ricentrato attorno all'architetto, non come figura isolata ma come soggetto capace di mantenere una sintesi più diretta tra scelte progettuali, responsabilità tecniche e costruzione (Fig. 7).

Il rafforzamento delle competenze costruttive costituisce una caratteristica di questa professione. Il riferimento all'architetto / artigiano esprime una volontà di continuità tra pensiero progettuale e materia costruttiva: Lorenzo Diez (2024) ricorda che l'etimologia del termine 'architetto' rinvia a quella dell'artigiano capo, mentre Karl Bötticher (1844-1852) ricostruisce la transizione 'dal capo artigiano al capo degli artigiani'. Il 'convergente' riattiva questa dimensione assumendo una conoscenza approfondita dei materiali, delle filiere locali e delle modalità di messa in opera.

Alcune pratiche contemporanee riflettono questo orientamento, in particolare quelle che lavorano su materiali a base biologica e minerale, sul riuso o sulla partecipazione diretta alla produzione. Il coinvolgimento diretto nella scelta dei materiali, delle tecniche esecutive e dei processi costruttivi non indebolisce il ruolo dell'architetto; al contrario ne consolida la centralità. Il lavoro svolto da oltre venticinque anni nel Vorarlberg, in Austria, riflette la costruzione di un'intelligenza collettiva tra architetti, abitanti e amministratori locali, attraverso progetti fortemente radicati nella materialità del legno e, al tempo stesso, capaci di sviluppare programmi di scala significativa. Questa dinamica territoriale è stata rafforzata dalla creazione, nel 1999, dell'Ufficio per le Questioni relative al Futuro, una struttura trasversale dedicata alla sostenibilità, alla partecipazione e allo sviluppo territoriale a lungo termine all'interno di un quadro interdisciplinare (Landes-Rechnungshof Vorarlberg, 2003).

Il paradosso del 'convergente' risiede nella sua apparente rinuncia alla centralità autoriale: favorendo co-progettazione e partecipazione l'architetto sembra attenuare il proprio ruolo; tuttavia recuperando una padronanza più diretta dei processi costruttivi riconfigura la propria posizione come perno di coordinamento tra decisione progettuale, competenze tecniche e realizzazione. In questa prospettiva la riduzione dell'incertezza passa attraverso un maggiore controllo dei parametri tecnici e una conoscenza puntuale dei materiali, delle filiere e dei processi produttivi. La figura del 'convergente' incarna dunque una strategia di stabilizzazione perché risponde alla complessità mediante il consolidamento della padronanza.

Il 'divergente': l'ibridazione come espansione | La figura archetipica del 'divergente' adotta una posizione diversa da quella del 'convergente' poiché non cerca di ridurre la complessità attraverso il controllo dei processi costruttivi, ma di assumerla come condizione produttiva, capace di aprire nuovi campi di azione per l'architetto. In questo caso l'ibridazione si orienta verso ambiti di ricerca e sperimentazione collegati all'architettura – intelligenza artificiale, scienze dei materiali, anticipazione strategica e pratiche di impegno civico e trasformazione sociale – con l'obiettivo di ampliare la capacità del progetto di leggere, interpretare e orientare condizioni incerte. In questa prospettiva Alvin Toffler (1970) ricordava che la capacità di 'apprendere, disapprendere e riapprendere' costituisce una competenza centrale in un mondo instabile. Il 'divergente' assume questa plasticità identitaria: non difende il perimetro tradizionale della disciplina ma lo estende verso campi nei quali le competenze architettoniche possono essere trasferite, rielaborate e applicate a problemi più ampi. Tale caratteristica è coerente con i percorsi individuati da Harriet Harriss (Harriss, Hyde and Marcaccio, 2020), in particolare con quelli dei 'Beyond', che operano oltre i confini convenzionali della professione continuando tuttavia a mobilitare strumenti, metodi e capacità propri della formazione architettonica.

L'esempio dell'intelligenza artificiale è rivelatore: invece di percepire l'IA come minaccia, alcuni architetti scelgono di 'entrare nella scatola nera' degli algoritmi. Stanislas Chaillou[2], architetto e ingegnere specializzato in machine learning, sviluppa strumenti generativi che incrociano geometria e apprendimento automatico. Prima di lui altri architetti hanno lavorato in questo campo (Greg Lynn, il Paperless Studio della Columbia University di New York o lo studio fabric.ch in Svizzera) esplorando, fin dagli anni Duemila, gli ambienti digitali e computazionali come nuovi territori del progetto (Fig. 8).

L'ibridazione divergente si manifesta anche nella trasformazione della materia stessa. Timothée Boitouzet[3], formato in architettura e scienze dei materiali con un master in architettura e scienza dei materiali presso il MIT e la Harvard University, ha sviluppato un processo di modificazione molecolare del legno per migliorarne le proprietà meccaniche e ambientali (Figg. 9, 10). In questo caso l'architetto non agisce soltanto sulla messa in opera, ma sulla costituzione stessa del materiale. Il 'divergente' cerca di ridurre l'incertezza integrandola come condizione produttiva; l'incremento delle competenze diventa una leva di adattamento posizionando l'architetto come mediatore tra sistemi complessi, più che come garante di una coerenza entro un perimetro disciplinare rigido.

L'ibridazione come operatore ecosistemico dell'innovazione infrastrutturale | Le figure del 'con-

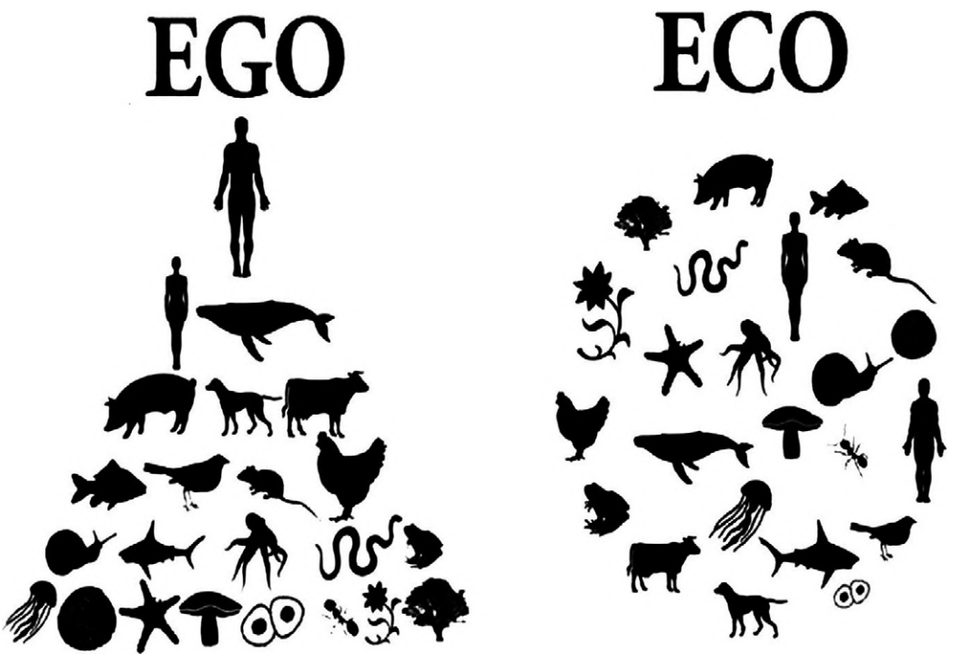


Fig. 2 | Ego-Eco diagram: humanity is part of the ecosystem, not separate from it or placed above it (credit: S. Lehmann, 2010).

vergente' e del 'divergente' non rappresentano modelli contrapposti né traiettorie professionali rigidamente separate poiché derivano dalla stessa matrice: l'ibridazione intesa come ampliamento delle competenze e ricomposizione dei ruoli dell'architetto. La differenza risiede nel modo in cui ciascuna figura affronta la complessità: il 'convergente' orienta l'ibridazione verso il rafforzamento della padronanza tecnica, costruttiva e decisionale del progetto; il 'divergente' la orienta invece verso l'apertura a campi di ricerca e sperimentazione collegati all'architettura, nei quali le competenze architettoniche vengono trasferite, rielaborate e applicate a condizioni nuove. In entrambi i casi l'architetto amplia il proprio campo d'azione, ma secondo strategie differenti: il 'convergente' cerca di ridurre l'incertezza ricostruendo continuità tra concezione, decisione e realizzazione; il 'divergente' assume l'incertezza come condizione produttiva e la affronta attraverso la traduzione tra saperi, strumenti e sistemi diversi. Queste due figure consentono di comprendere che la trasformazione infrastrutturale del progetto architettonico non riguarda soltanto l'organizzazione della professione ma investe le modalità con cui il progetto costruisce relazioni tra conoscenze, responsabilità e decisioni; in questo senso l'ibridazione costituisce l'operatore centrale del passaggio dalla frammentazione alla ricomposizione.

L'analisi sviluppata nelle sezioni precedenti conduce quindi a uno spostamento concettuale rilevante: l'innovazione architettonica non può essere ridotta al miglioramento delle prestazioni tecniche o all'introduzione di strumenti digitali avanzati: deve essere compresa come trasformazione delle strutture cognitive, organizzative e relazionali che rendono possibile il progetto. In questa prospettiva il progetto architettonico non appare più come un oggetto concluso ma come un ecosistema dinamico, composto da attori, norme, saperi, tecnologie, risorse materiali e condizioni ambientali in continua interazione.

Concepire il progetto come ecosistema significa riconoscere che ogni decisione progettuale si colloca entro una rete di interdipendenze; questa lettura si collega agli studi sui sistemi complessi (von Bertalanffy, 2012; Morin, 2007) e richiama l'idea di 'Nuova Alleanza' formulata da Prigogine e Stengers (1979), nella quale determinismo e divenire, stabilità e incertezza sono intesi come condizioni compresenti nella produzione della conoscenza. Il progetto non può quindi essere interpretato come un programma lineare da eseguire in un contesto stabile; diventa piuttosto un processo evolutivo, capace di adattarsi a condizioni mutevoli e di produrre nuove configurazioni a partire dall'interazione tra vincoli, attori e possibilità operative.

L'innovazione infrastrutturale si colloca precisamente a questo livello: modifica le condizioni attraverso cui il progetto organizza i saperi, distribuisce le responsabilità e costruisce le decisioni. L'ibridazione opera come dispositivo di 'reliance' perché consente di rimettere in relazione ciò che la 'déliance' aveva separato: competenze specialistiche, strumenti tecnici, responsabilità professionali, processi decisionali e ambiti di intervento.

Ciò che aveva prodotto frammentazione – specializzazione, tecnicizzazione e diversificazione delle competenze – può così diventare, entro una logica ecosistemica, la base per una nuova capacità di sintesi progettuale. In questo senso l'innovazione infrastrutturale non consiste nell'aggiungere ulteriori strumenti al processo progettuale ma nel trasformare le condizioni che permettono al progetto di funzionare come sistema di relazioni. Il progetto architettonico diventa così un'infrastruttura cognitiva e organizzativa in trasformazione: non solo il luogo in cui si produce una soluzione spaziale ma il dispositivo attraverso cui saperi, attori e decisioni vengono ricomposti per affrontare la complessità contemporanea.

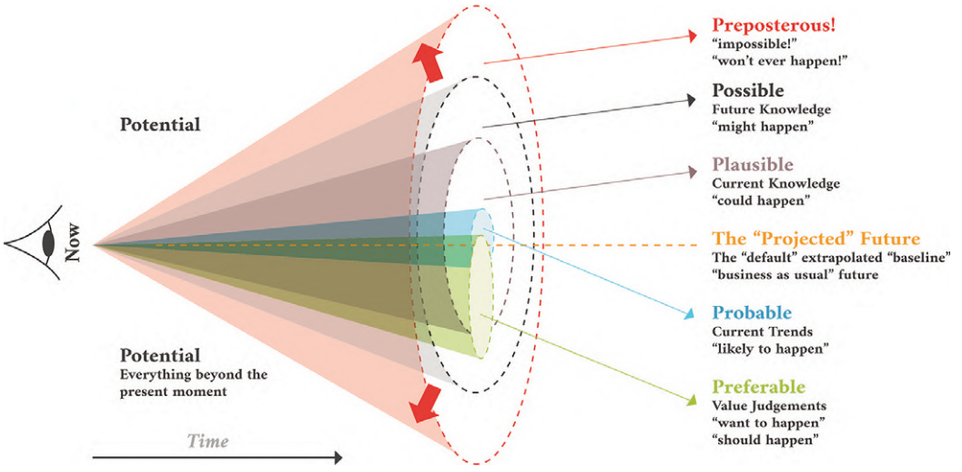


Fig. 3 | Conventional representation of the future as a cone of possibilities (source: UNDP, 2018).

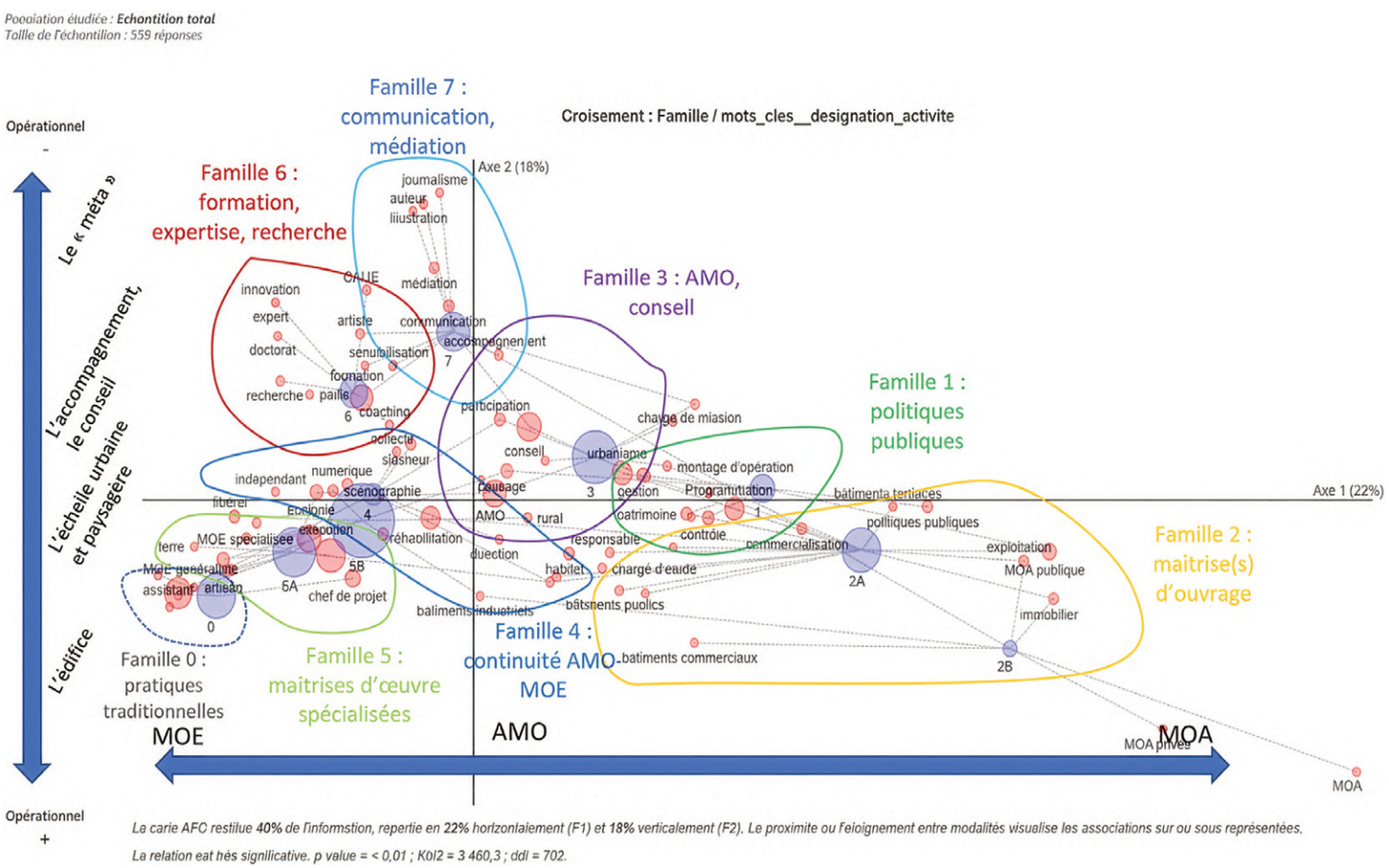
Apporti scientifici e implicazioni | Il primo apporto di questo saggio al dibattito sull'innovazione del progetto consiste nello spostare l'attenzione dall'innovazione come esito formale, materiale o tecnologico all'innovazione come trasformazione delle condizioni di produzione del progetto. Mentre in architettura l'innovazione è tradizionalmente associata alla forma, al materiale o alla tecnologia, in questa sede si propone di riqualificarla come trasformazione infrastrutturale del processo progettuale, situandola non più nell'oggetto ma nelle condizioni della sua produzione. Il secondo apporto riguarda la concettualizzazione di una trasformazione infrastrutturale articolata attorno alle tre dimensioni di assetto, metodo e identità, in una griglia analitica che consente di connettere mutazioni normative, evoluzioni metodologiche e ricomposizioni professionali entro un modello coerente. Il terzo apporto risiede nella formalizzazione di un modello trasferibile: le figure archetipiche del 'convergente' e del 'divergente' costituiscono strumenti analitici per interpretare traiettorie professionali in diversi contesti nazionali e offrono una chiave di lettura adattabile ad altre discipline confrontate con processi analoghi di frammentazione e ibridazione.

Le ricadute di questo contributo riguardano anzitutto la formazione degli architetti: se l'innovazione si colloca a livello infrastrutturale, l'insegnamento non può limitarsi alla trasmissione di strumenti tecnici destinati a una rapida obsolescenza ma deve invece rafforzare competenze capaci di sostenere il progetto in condizioni di complessità: pensiero sistemico, capacità di sintesi, gestione dei processi, adattabilità, collaborazione e comunicazione. In questa direzione Harriet Harriss sottolinea l'importanza di competenze trasferibili quali comunicazione, risoluzione dei problemi e organizzazione (Harriss, Hyde and Marcaccio, 2020).

Il presente saggio apre inoltre una riflessione sulla governance del progetto: concepire il progetto come ecosistema implica ripensare la distribuzione delle responsabilità e le modalità di coordinamento tra attori, saperi e decisioni. La centralità dell'architetto non può più essere definita da una posizione gerarchica stabile ma dalla capacità di costruire sintesi tra sistemi complessi, rendendo leggibili le relazioni tra vincoli tecnici, istanze ambientali, responsabilità sociali e scelte progettuali.

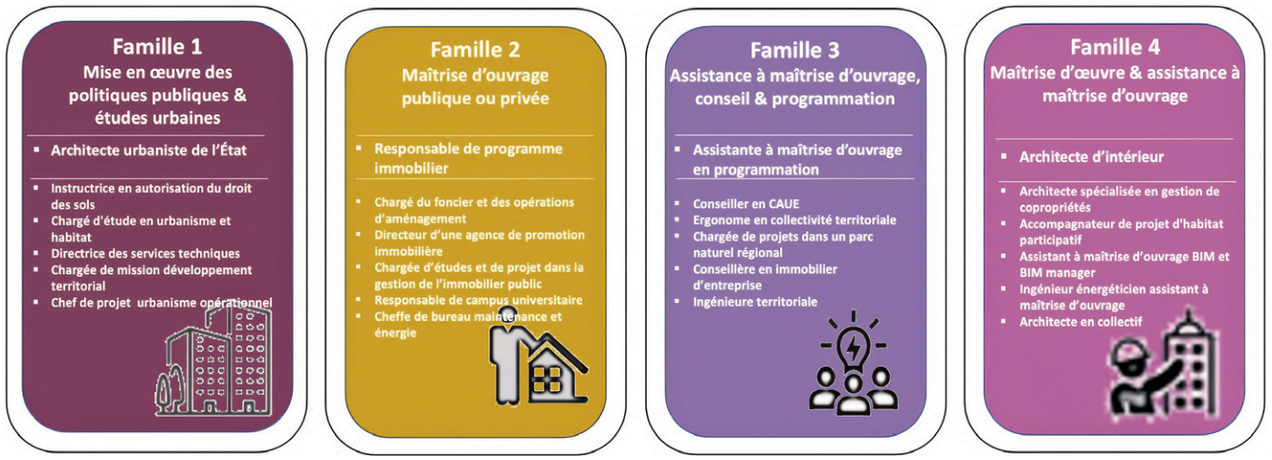
Sul piano professionale questo approccio apre la possibilità di una ridefinizione del profilo professionale: gli architetti, produttori di forme costruite, possono agire come mediatori tra competenze, strateghi del processo progettuale e operatori di 'reliance'. Tale evoluzione richiede il riconoscimento istituzionale di percorsi professionali 'ampliati', nei quali le competenze architettoniche vengono trasferite, rielaborate e applicate anche oltre i confini tradizionali della pratica progettuale. Infine l'innovazione infrastrutturale richiede la costruzione di nuove alleanze: non si tratta di un'unica alleanza tra discipline, ma di una pluralità di collaborazioni tra ambiti scientifici, tecnici, sociali e culturali. In questo quadro l'architettura non assume una posizione dominante ma opera come interfaccia capace di mettere in relazione saperi, attori e responsabilità, contribuendo a trasformare il progetto in uno spazio di ricomposizione della complessità.

Prospettive e conclusioni | L'analisi sviluppata apre tre principali direzioni di approfondimento: la prima riguarda la possibilità di condurre studi comparativi internazionali, utili a verificare come le figure del 'convergente' e del 'divergente' assumano configurazioni differenti in relazione ai contesti culturali, normativi e professionali; la seconda riguarda l'integrazione dell'approccio qualitativo con analisi quantitative basate sui dati disponibili sulla professione, al fine di osservare con maggiore precisione l'evoluzione dei percorsi professionali, la distribuzione degli incarichi, la diversificazione delle competenze e lo spostamento dei ruoli decisionali; la terza riguarda la formazione. La prospettiva proposta potrebbe essere sperimentata nelle scuole di architettura attraverso laboratori orientati alla costruzione di scenari, attività didattiche integrate tra discipline diverse e progetti concepiti come ecosistemi sperimentali di attori, saperi e responsabilità.



*La carte AFC restitue **40%** de l'information, répartie en **22%** horizontalement (F1) et **18%** verticalement (F2). La proximité ou l'éloignement entre modalités visualise les associations sur ou sous représentées.*

La relation est très significative. p value = < 0,01 ; KhI2 = 3 460,3 ; ddl = 702.



Figg. 4-6 | The identification of seven families of activity and their positioning in relation to more consolidated practices (family 0) through correspondence analysis (source: education.espazium.ch; credits: V. Biau and E. Macaire, 2024).

La riflessione muove da una constatazione: la crisi contemporanea dell'architettura non deriva prioritariamente da un deficit di innovazione tecnica ma dalla progressiva frammentazione delle strutture cognitive, organizzative e identitarie che orientano il processo progettuale. Richiamando la nozione di 'déliance' (Bolle de Bal, 2003) e il paradigma di semplificazione (Morin, 2005) l'analisi ha mostrato come l'aumento della complessità socio-ecologica – di cui sono espressione la moltiplicazione delle norme ambientali, l'iperspecializzazione delle competenze e la tecnicizzazione digitale – abbia contribuito a separare responsabilità, saperi e ambiti decisionali, indebolendo la capacità della professione di produrre sintesi.

L'ipotesi centrale del contributo è che questa condizione richieda una trasformazione delle condizioni attraverso cui il progetto viene pensato, organizzato e realizzato. In questa prospettiva l'innovazione infrastrutturale non riguarda soltanto strumenti, materiali o prestazioni ma il modo in cui il progetto costruisce relazioni tra attori, competenze, vincoli e decisioni. L'esplorazione del concetto di ibridazione (Halpern, 2020) ha permesso di riconoscere un processo dinamico di ampliamento delle competenze e di ricomposizione dei ruoli e le figure archetipiche del 'convergente' e del 'divergente' sono state proposte come due espressioni di questa stessa matrice trasformativa: la prima orientata al consolidamento della padronanza tecnica e costruttiva, la seconda all'apertura verso ambiti di ricerca e sperimentazione collegati all'architettura.

L'ibridazione appare quindi una leva sistemica capace di trasformare la frammentazione in possibilità di ricomposizione, consentendo il passaggio dalla 'déliance' alla 'reliance' pur senza eliminare la complessità, organizzandola entro nuove relazioni tra saperi, responsabilità e pratiche. Considerato come ecosistema, il progetto architettonico non è più soltanto un esito formale o una prestazione tecnica, ma un'infrastruttura cognitiva e organizzativa in trasformazione, capace di integrare interdipendenze, incertezze e molteplicità di attori.

Il contributo propone così una lettura del progetto architettonico come dispositivo relazionale e organizzativo in evoluzione; l'innovazione infrastrutturale risiede nella capacità di riconfigurare assetti, metodi e identità professionali, rendendo il progetto uno spazio in cui la complessità può essere interpretata, coordinata e orientata. Questa impostazione permette di superare l'opposizione tra controllo del processo e apertura all'incertezza: l'azione progettuale non viene abbandonata, collocata piuttosto entro una lettura più consapevole delle relazioni tra attori, vincoli, competenze e decisioni.

La ricerca presenta tuttavia alcuni limiti: si fonda principalmente su un'analisi qualitativa e concettuale, costruita attraverso letteratura scientifica, dati di settore e osservazione delle pratiche professionali. Tale approccio consente di formalizzare un modello interpretativo ma non costituisce una validazione empirica esaustiva; le figure del 'convergente' e del 'divergente' devono quindi essere intese come strumenti analitici, non come categorie statistiche stabilite. Inoltre lo studio resta prevalentemente centrato su contesti europei e nordamericani; indagini comparative in altri contesti culturali, normativi e professionali sarebbero necessarie per verificare la trasferibilità del modello. Alla luce di questi limiti la formalizzazione dell'innovazione infrastrutturale richiede ulteriori sviluppi metodologici; studi di caso approfonditi, indagini quantitative e sperimentazioni pedagogiche potrebbero permettere di valutare con maggiore precisione gli effetti dell'ibridazione sulla governance dei progetti, sulla distribuzione delle responsabilità e sulla trasformazione della formazione architettonica. Nonostante tali limiti l'analisi conferma che la trasformazione in corso non può essere compresa attraverso i soli indicatori di prestazione tecnica e richiede una ricomposizione profonda del ruolo dell'architetto in un mondo caratterizzato da incertezza e interdipendenza. La questione non è restaurare una centralità perduta né arretrare di fronte alla complessità, piuttosto ridefinire le condizioni dell'azione progettuale. In questo orizzonte l'innovazione infrastrutturale consente al progetto architettonico di diventare uno spazio di costruzione di nuove alleanze, capaci di articolare padronanza e apertura, stabilità e trasformazione.

Contemporary transformations driven by the environmental crisis, digital acceleration, and new institutional arrangements are profoundly reshaping the conditions under which architecture is produced. In this context, innovation is most often interpreted through a technological lens – energy performance, the digitalisation of processes, and the optimisation of flows – whereas studies on systemic transitions show that technical progress alone is not sufficient to generate lasting change. These transformations instead require structural changes in governance models, professional organisations, and modes of knowledge production (Geels, 2002; Loorbach, 2010; Morin, 2015). From this standpoint, the architectural project constitutes a strategic field in which regulatory constraints, environmental requirements, economic rationalities, and social expectations converge.

Recent debate on Industry 5.0 emphasises human-centred, resilient, and sustainable systems capable of combining technological performance with social values (European Commission, 2021). This marks a significant paradigm shift: innovation can no longer be conceived solely as technical efficiency, but must be understood as an integrated transformation of productive and organisational systems. In the field of architecture, however, innovation is still frequently assessed through performance indicators rather than as a reconfiguration of professional and decision-making models. In this context, the contemporary crisis does not concern only the built object but, more fundamentally, project management and the very positioning of the profession. Increasing regulatory complexity, the progressive specialisation of expertise, and digital fragmentation have weakened the architectural project's the capacity for synthesis and coordination, redistributed responsibilities, and made disciplinary identity more unstable. The question therefore exceeds technical innovation and concerns the reconfiguration of the cognitive, organisational, and relational infrastructures that structure the architectural project.

The hypothesis developed in this contribution is that this condition originates in the environmental awareness that matured between the 1980s and 1990s. The progressive integration of ecological concerns into architecture led to the emergence of new specialised actors and to a redefinition of competencies, calling into question the historical centrality of the architect within decision-making processes. Faced with increasing complexity, the design disciplines have often responded through analytical models based on division and specialisation. Marcel Bolle de Bal (2003) defines this process as 'déliance', while Edgar Morin (2004) analyses its effects within the 'paradigm of simplification'. This dynamic has encouraged hyper-specialisation, contributed to the fragmentation of professional assignments, and separated design, technical expertise, and decision-making; the rise of digital technologies and managerial tools has further amplified this segmentation.

To analyse these transformations, the article adopts a systemic approach structured around three dimensions – framework, method, and identity / practices – in order to identify the structural mechanisms that fuel fragmentation and to explore the conditions for overcoming it. From this perspective, innovation is considered as 'infrastructural innovation', understood as a transformation of the conditions of project production and not as a simple improvement of built objects.

At the centre of this mutation lies hybridisation, understood as a 'process of recomposition and augmentation of competencies' (Halpern, 2020), which does not imply a simple juxtaposition of disciplines but rather an active transformation of knowledge and roles. From this process emerge two archetypal figures: the 'convergent', oriented towards intensifying technical and constructive control in order to reduce uncertainty, and the 'divergent', who extends hybridisation into adjacent fields and assume uncertainty as a driving force of the project. These figures derive from the same movement of expanding practices: what 'déliance' has separated can therefore be reconfigured within a logic of 'reliance' (Morin, 2005), understood as the systemic recomposition of knowledge and actors.

The objective of this contribution is to identify these dynamics through a critical reading of the current state of the profession and to propose an analytical framework capable of rethinking its repositioning. By conceptualising innovation as infrastructural and hybridisation as an operative process, the essay aims to contribute to advancing knowledge on the systemic transformation of the architectural project and to open up perspectives for professional alliances capable of engaging with contemporary complexity.

Rethinking innovation: systemic innovation and the transformation of design and professional practices | Contemporary research on innovation has progressively shifted analysis from an approach centred on technical performance towards a systemic understanding of transformation processes. Studies on socio-technical transitions show that sustainable transformations do not arise solely from incremental innovations, but from a recomposition of institutional arrangements, actors, and cognitive structures, thereby conceiving innovation as a multi-level process that articulates technologies, organisations, and social structures (Geels, 2002; Schot and Geels, 2008). Transition studies have been further expanded by research on adaptive governance and professional and managerial models (Loorbach, 2010), which highlights how the growing complexity of contemporary systems

requires greater capacities for integration and coordination.

This perspective converges with the reflections on 'complex thought' developed by Morin (2005), according to whom the fragmentation of knowledge constitutes a decisive obstacle to understanding and acting within uncertain contexts. This evolution forms part of a deeper shift in the ways in which thought organises and addresses complexity. As early as the last century, Prigogine and Stengers (1979), in La Nouvelle Alliance, called for the separation between the natural sciences and the human sciences to be overcome, so as to integrate uncertainty, irreversibility, and interdependence into the production of knowledge, clarifying a decisive epistemological passage: complexity cannot be addressed through simplification, but through processes of recomposition.

In the industrial field, the emergence of the Industry 5.0 paradigm reflects this shift: moving beyond a conception of innovation centred exclusively on productivity and automation, it promotes human-centred, resilient, and sustainable systems in which technological performance, social responsibility, and the adaptive capacity of production processes are integrated within a single horizon of transformation (European Commission, 2021). In this framework, innovation is understood as an integrated transformation of production systems, implying organisational reconfiguration and social responsibility.

These developments find resonance in contemporary architectural production: the studies by Harriet Harriss, particularly Architects After Architecture – Alternative Pathways for Practice (Harriss, Hyde and Marcaccio, 2020) and Architecture's Afterlife – Breaking the Profession that is Breaking the Planet[1] (Barosio et alii, 2024), investigate the redefinition of professional trajectories in the face of environmental and institutional crises, highlighting the expansion of fields of intervention and the need to move beyond traditional forms of professional practice.

In the French context, the study conducted under the direction of Véronique Biau and Elise Macaire (Biau et alii, 2024), within the call for expressions of interest entitled Skills and Professions of the Future and dedicated to the Architecture sector, confirms the evolution of the competencies required and the diversification of profiles, emphasising the growing importance of transversal skills and the recomposition of professional pathways. The qualitative analyses are corroborated by the quantitative data produced annually by the Ordre des Architectes in Archigraphie (Fig. 1), which document the evolution of modes of professional practice, the diversification of activities, the transformation of the economic models of architectural firms, and demographic changes in the sector. These data make several ongoing structural transformations observable: the reconfiguration of commissions, the growth of specialist competencies, and the expansion of fields of intervention. Taken together, these contributions attest to a profound transformation of the architectural field. Yet, despite this converging evidence, innovation in architecture continues to be analysed predominantly within the domain of technique, through energy performance, digital tools, and material experimentation. Although these dimensions are essential, they do not account for the mutation of the cognitive, organisational, and decision-making structures that support the design process.

There is therefore a gap between the transformations affecting the profession, which can be observed through sector studies and statistical data, and the absence of a theoretical conceptualisation of innovation as an infrastructural transformation of the architectural project. The literature has extensively explored technological innovation applied to architecture, but has less often investigated innovation as a reconfiguration of the frameworks that organise design, coordination among actors, and the production of decisions.

The notion of 'déliance', proposed by Bolle de Bal (2003), helps to interpret the growing division of knowledge and responsibilities: associated with the 'paradigm of simplification' described by Morin (2005), it highlights the effects of hyper-specialisation on the profession's capacity for synthesis and coordination. In parallel, studies on hybridisation offer a conceptual framework for thinking recomposition: hybridisation is described as a process of transformation based on the interweaving and expansion of competencies, capable of producing unprecedented organisational forms (Halpern, 2020). However, the link between the fragmentation of competencies, the evolution of cognitive structures, and the hybridisation of practices remains insufficiently articulated in the architectural field. This essay is situated within this theoretical space that has not yet been fully explored, proposing to conceptualise architectural innovation as infrastructural innovation, understood as the transformation of the cognitive, organisational, and relational structures of the design process, and to analyse hybridisation as the central process of this recomposition.

'Déliance' and infrastructural fragmentation: conceptual framework and structural conditions | The recurring idea that architects are in a condition of 'crisis' has accompanied disciplinary debate for several decades. Already in the late 1990s, Philippe Rahm (Nourrigat, 1999) evoked a profession emerging 'in the midst of a crisis', while Xavier Leibar (Nourrigat, 1999) underlined a crisis that was 'identity-based' rather than conjunctural. In 2004, a report by the French Senate (Dauge, 2004) explicitly mentioned 'the crisis of a regulated profession', and more recently Susanne Stacher (2023) devoted a volume to analysing the responses and strategies adopted by architects in the face of crises. This continuity in the debate invites us to move beyond the hypothesis of a transitional phase and to question the structural conditions of a lasting transformation. What emerges is not so much a state of crisis as a progressive contraction of the commissions, responsibilities, and centrality of the role recognised for architects.

The hypothesis is that, as complexity increases, the adaptations implemented by architects increasingly lead them towards 'déliance' and towards an impoverishment of their professional field of action. The reading proposed here assumes that the origin of this 'déliance' becomes especially evident when the management of complexity becomes central within the environmental questions of the 1970s.

Several authors have set out the need for a paradigm shift in the management of knowledge and in modes of thought, framing an expanded complexity: the Meadows report (Meadows et alii, 1972) introduced a systemic modelling of the interactions between population, resources, and pollution, revealing the physical limits of growth; Hans Jonas (1990) insisted on the responsibility



Fig. 7 | The realisation of the Ecomusée d'Alsace by the ETC collective (source: collectifetc.com, 2016).

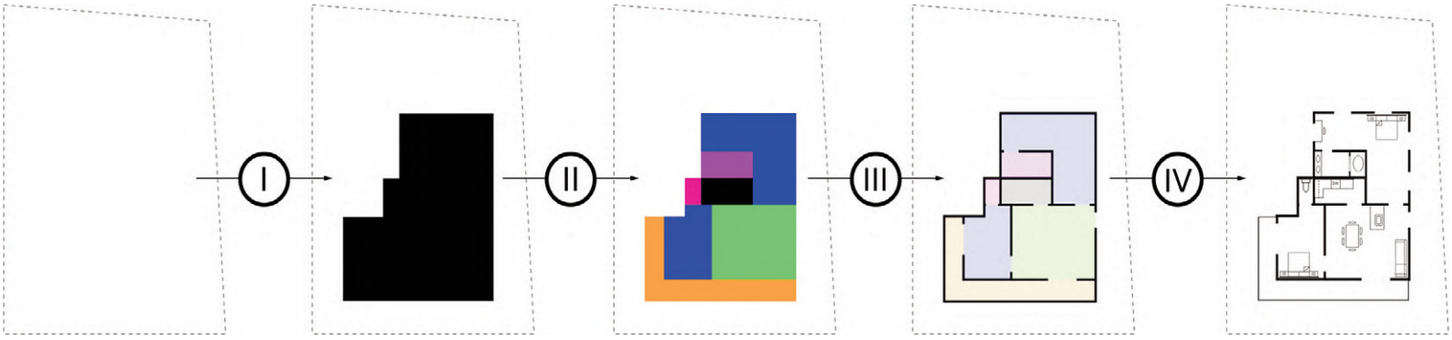


Fig. 8 | Example of generative architecture (credit: S. Chaillou, 2019).

associated with the irreversibility of technical effects; Prigogine and Stengers (1979) affirmed the need to renew an experimental dialogue in order to understand more clearly the relation between humanity and nature. Buckminster Fuller, through Synergetics, called for the development of a more systemic approach to improve resource management (Buckminster Fuller and Applewhite, 1975); Bruno Latour (2015), starting from the concept of Gaia developed by Lovelock (2017), recalled the need to rethink the interdependence between human beings and terrestrial systems (Fig. 2).

In architecture, however, this complexity has been translated above all into sectoral regulatory devices, as shown by the Haute Qualité Environnementale (HQE) approach which, from 1996 onwards, divided environmental quality into fourteen targets, making Marcel Bolle de Bal's (2003) concept evident of 'déliance': a modern principle founded on the separation of functions and forms of knowledge. Edgar Morin (2004) refers, in this regard, to the 'paradigm of simplification', in which complexity is addressed through division rather than integration. In this way, the institutional and regulatory framework does not merely define criteria of environmental quality, but consolidates a management of the project by separate fields, in which performance, competencies, and responsibilities tend to be assessed autonomously rather than recomposed within a unified design vision.

The analytical management of complexity | The operational response to increasing complexity has progressively been structured through an analytical method, based on the decomposition of the project into distinct performance fields. The HQE targets, followed by the proliferation of protocols, certifications, and environmental assessment systems – BREEAM, LEED, WELL, E+C-, and BDM – reflect an approach in which the different dimensions of environmental quality are measured, verified, and optimised separately. In this scenario, Hudin and Veran (2012) underlined the 'urgency of establishing a common language' in the face of the multiplication of reference systems.

Measurable technical performance thus becomes the principal criterion through which the project is legitimised: each dimension is assessed through specific indicators and translated into quantitative evidence, resulting in an accumulation of technical evidence that does not always convey the overall coherence of the intervention. As Morin (2015, p. 77) recalls, «[…] quantification and compartmentalisation are the enemies of understanding». Methodological fragmentation therefore tends to multiply specialist competencies and verification tools, but it does not necessarily guarantee a unified design synthesis.

The rise of digital technologies reinforces this logic. BIM, often presented as a tool that facilitates collaboration among different competencies, introduces a shared and interoperable digital model, but redistributes responsibilities through the creation of specialised roles, such as the BIM manager. Artificial intelligence and generative design strengthen this approach: the algorithm analyses thousands of variants according to predefined criteria in order to optimise surface area, density, or energy performance. Design thus risks being reduced to a computational problem to be solved, while the method tends to privilege parametric optimisation at the expense of interpretative synthesis. Buckminster Fuller (2010) had already denounced the effects of excessive specialisation, which limits any overall vision. Managing complexity through segmentation is therefore an effective method for addressing isolated variables, but an insufficient one for thinking systemic interdependencies.

Identity and practices: the narrowing of the professional perimeter | The effects of this framework and of the analytical method that supports it are directly reflected in the professional identity of the architect. The increase in technical, regulatory, and environmental requirements has expanded the number of competencies involved in the design process: alongside traditional contributions – structural engineering, building services, and economics – calls for tenders and selection procedures now require specialised figures in ecology, reuse, client-side and user-assistance roles, BIM management, and other fields. This articulation strengthens the technical capacity of the project, but makes the coordination of actors, responsibilities, and decision-making fields more complex.

As Véronique Biau (2020) observes, these transformations modify the architect's position in the decision-making chain and redefine the balance among the different competencies involved. Historically recognised as the figure responsible for the overall governance of the project – able to articulate form, functions, technical requirements, cultural concerns, economic constraints, administrative procedures, and relations with the client – the architect now sees his or her centrality questioned within a broader network of specialist knowledge. The function does not disappear, but is repositioned within a more distributed system of coordination, in which some activities are outsourced, others fragmented, and many decisions depend on the interaction among different actors.

This leads to a narrowing of the architect's professional perimeter: not only a reduction in the commissions directly controlled, but also a weakening of the capacity to maintain a unified synthesis among the components of the project. The overall mastery of the intervention thus tends to give way to a segmented management of responsibilities.

The fragmentation observed is therefore not a punctual adaptation, but a structural phenomenon; it derives from a cumulative sequence: environmental complexity is translated into sectoral regulatory devices; performance parameters are managed through analytical methods; digital technologies introduce new forms of technicisation; and the organisation of the project is articulated through increasingly specialist competencies. The 'déliance' described by Bolle de Bal (2003) is manifested here as a separation between the cognitive structures, organisational arrangements, and operative relations of the architectural project.

This observation confirms the contribution's hypothesis: the contemporary identity crisis of architects does not primarily derive from technological lag, but from a management of complexity based on separation rather than integration. The question is therefore infrastructural: it concerns the conditions through which the project organises knowledge, responsibilities, and decisions; it is this structural 'déliance' that makes recomposition necessary.

From uncertainty to hybridisation as infrastructural innovation | In a world marked by climatic instability, geopolitical tensions, and technological acceleration, uncertainty is no longer an exception, but a structural condition. Yet one certainty remains: to make architecture, in one way or another, means to decide. This does not imply that the architect decides alone; on the contrary, for the project to exist, a decision is nevertheless required. The essential question therefore becomes how to decide under conditions of uncertainty.

Ulrich Beck (2008) describes this condition as the advent of a 'risk society', characterised by global, invisible, and unpredictable threats; Edgar Morin (2000), in turn, recalls that every action entails a wager, since it implies awareness of risk and the impossibility of total control. In this framework, the search for a single solution appears illusory; it therefore becomes necessary to replace the idea

of 'solution' with the construction of urban and architectural strategies, capable of orienting design action without claiming to eliminate uncertainty. The strategy of intervention thus prevails over the mere resolution of the problem (Morin, 2020), since it enables the project to adapt to changing conditions, integrate different variables, and progressively redefine its choices. From this derives the need to modify the ways in which the project organises and addresses complexity, opening the discipline to more hybrid forms of knowledge, decision, and action.

Hybridisation instead indicates a process through which knowledge, tools, roles, and responsibilities are brought into relation until they modify the very way in which the project is conceived, organised, and decided. Gabrielle Halpern (2020) defines hybridisation as a creative fusion capable of producing a new reality, distinct from the simple juxtaposition of pre-existing elements.

This shift responds directly to the limits of the paradigm of simplification analysed above. Where 'déliance' separates knowledge, functions, and responsibilities, hybridisation makes it possible to bring them back into relation; what had contributed to the fragmentation of the project – specialisation, technicisation, environmental complexity, and the multiplication of actors – can become a lever of recomposition if integrated within a design logic capable of producing synthesis. The question is therefore not to restore the architect's lost centrality, but to redefine the conditions through which the project can coordinate competencies, responsibilities, and decisions in a complex environment. Hybridisation therefore constitutes a conceptual framework for rethinking architectural innovation: not as a simple technical improvement, but as a transformation of the cognitive and organisational structures through which the project addresses complexity, constructs relations among different forms of knowledge, and enables shared decisions to be taken.

Method: systemic reliance and adaptive strategies | Hybridisation is not limited to a theoretical stance but implies a method. When confronted with uncertainty, Morin opposes the programme – a rigid sequence suited to a stable environment – to strategy, which is capable of evolving according to circumstances (Morin, 2000). Infrastructural innovation presupposes precisely this transition from the programmatic to the strategic.

Conceiving the project as an ecosystem represents the methodological translation of this orientation. Von Bertalanffy's systems theory (2012) and Tansley's notion of ecosystem (1935) offer an organisational model based on interdependence and adaptability: an ecosystem is not a sum of elements, but a dynamic whole in which every component interacts with the others. Applied to the architectural project, this perspective leads us to consider it as an open, complex system, capable of articulating environmental, social, technical, and economic data. Hybridisation then becomes a method of 'reliance' (Morin, 2004). It makes it possible to articulate distinct environments – scientific, technological, cultural, and social – in order to produce adaptive strategies, rather than crystallised responses. Strategic anticipation tools and 'design fiction' illustrate this orientation: anticipatory strategy does not aim to predict a single future, but to elaborate scenarios that integrate uncertainties and variables. 'Design fiction', as developed by Dunne and Raby (2013) or analysed by Nicolas Nova (2014), proposes 'diegetic prototypes' (Kirby, 2010) that materialise possible scenarios in order to make them available for discussion (Fig. 3). The architectural project can become an object for this kind of discussion, not as a definitive solution, but as a strategic hypothesis through which possible transformations of the built environment can be explored, discussed, and oriented.

Infrastructural innovation therefore operates through methodological hybridisation: it is not limited to solving circumscribed problems, but constructs capacities for systemic integration and progressive adaptation; in this way, it modifies the modes of project production, recognising design imagination, scenario building, and the transversal movement between forms of knowledge as necessary tools for orienting decisions in conditions of complexity and uncertainty.

Identity and practices: expansion as augmentation | Hybridisation also entails an identity transformation. Halpern (2020) contrasts the exclusive identity of 'or' with the inclusive alterity of 'and': the architect is no longer defined by a single, rigidly delimited function, but by the capacity to relate, integrate, and expand different competencies. From this perspective, professional identity is no longer constructed through the separation of fields, but through the capacity to cross and recompose them.

The studies by Harriet Harriss, in collaboration with several researchers, show that almost 40% of architecture graduates in Europe and the United States develop professional pathways outside conventional design practice, while nevertheless continuing to mobilise architectural competencies (Harriss, Hyde and Marcaccio, 2020). Far from representing abandonment, these pathways express an expansion of professional practice. The study conducted by Véronique Biau and Elise Macaire (2024) confirms this diversification, identifying new families of activities ranging from client-side roles to mediation and research (Figg. 4-6).

These professional outcomes do not indicate a dispersal of the discipline, but a process of expanding its operative possibilities. Hybridisation enriches the architect's core competencies by bringing them into relation with other fields of knowledge and action – technology, the social sciences, culture, and politics – and thereby contributes to constructing a more permeable professional identity, one capable of engaging with complexity rather than hardening within predetermined boundaries. This dynamic can assume different forms: some architects reinvest in materiality and construction processes, strengthening the technical mastery of the project; others explore contiguous fields, such as artificial intelligence, biology, or research into innovative materials; in both cases, hybridisation constitutes the common matrix and acts as the driver of a recomposition of professional roles.

The passage from 'déliance' to 'reliance' therefore occurs through hybridisation: what had fragmented – specialisation, diversification, and openness – becomes a vector of innovation when these elements are integrated within a systemic dynamic. Infrastructural innovation does not primarily modify the architectural object but transforms the very conditions of its production, reorganising frameworks, methods, and identities.

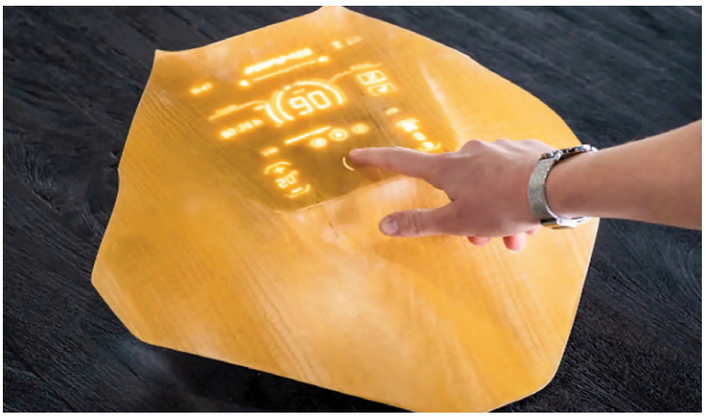
It should be noted, however, that, although hybridisation constitutes the matrix of the infrastructural transformation of the architectural project and of architects' professional identity, this process does not lead to a single trajectory but to two archetypal figures, defined here as the 'convergent' and the 'divergent'. These are not rigid sociological categories or closed alternative typologies, but interpretative tools useful for describing two strategies of professional repositioning in the face of contemporary complexity. Both arise from the same expansion of competencies, but they orient the relationship between project and uncertainty differently: the 'convergent' figure tends to reduce uncertainty by strengthening technical and constructive mastery; the 'divergent' figure tends instead to accept complexity as a productive condition, extending the architect's action towards fields connected with architecture.

The 'convergent': hybridisation oriented towards mastery | The archetypal figure of the 'convergent' expresses a strategy oriented towards the coherence of the project and the mastery of construction processes. Faced with the fragmentation of competencies and the multiplication of technical mediations, the 'convergent' tends to bring the project back into a more controllable system, strengthening the relationship between conception, decision, and realisation. In this case, hybridisation does not translate into an opening towards fields outside the discipline, but into the consolidation of the link between design conception and material production.

In her research, Béatrice Durand (2023) defines 'mediations' as 'intermediate objects or operations, relations of dependence or delegation'. The 'convergent' seeks to reduce these mediations in order to shorten the decision-making chain and bring construction processes back within the architect's field of competence. This stance does not necessarily entail a reduction in the scale of the intervention; rather, it concerns the intention to reduce the number of intermediate passages, interlocutors, and delegations that separate the design phase from the realisation phase. In this way, the design process is recentred around the architect, not as an isolated figure, but as a subject capable of maintaining a more direct synthesis between design choices, technical responsibilities, and construction (Fig. 7).

The strengthening of construction competencies is a characteristic of this professional stance. The reference to the architect / craftsman expresses a desire for continuity between design thinking and construction materiality. Lorenzo Diez (2024) recalls that the etymology of the term 'architect' refers to that of the chief craftsman, while Karl Bötticher (1844-1852) reconstructed the transition 'from master craftsman to chief of craftsmen'. The 'convergent' reactivates this dimension by requiring in-depth knowledge of materials, local supply chains, and modes of implementation.

Certain contemporary practices reflect this orientation, particularly those that work with bio-based and mineral materials, reuse, or direct participation in production. Direct involvement in the choice of materials, execution techniques, and





Figg. 9, 10 | Timothée Boitouzet and the translucent wood produced by Woodoo (sources: entreprendre.fr, 2023; woodworkingnetwork.com, 2020).

construction processes does not weaken the role of the architect; on the contrary, it consolidates the architect's centrality. The work carried out for more than twenty-five years in Vorarlberg, Austria, reflects the construction of a collective intelligence among architects, inhabitants, and local administrators, through projects strongly rooted in the materiality of timber and, at the same time, capable of developing programmes of significant scale. This territorial dynamic was reinforced by the creation, in 1999, of the Büro für Zukunftsfragen ('Office for Future-Related Issues'), a transversal structure dedicated to sustainability, participation, and long-term territorial development within an interdisciplinary framework (Landes-Rechnungshof Vorarlberg, 2003).

The paradox of the 'convergent' lies in the apparent renunciation of authorial centrality: by favouring co-design and participation, the architect seems to attenuate his or her role; yet, by recovering a more direct mastery of construction processes, he or she reconfigures that position as a pivot of coordination between design decision, technical competencies, and realisation. From this perspective, the reduction of uncertainty passes through greater control of technical parameters and a precise knowledge of materials, supply chains, and production processes. The figure of the 'convergent' therefore embodies a strategy of stabilisation because it responds to complexity through the consolidation of mastery.

The 'divergent': hybridisation as expansion | The archetypal figure of the 'divergent' adopts a different stance from that of the 'convergent', since it does not seek to reduce complexity through control of construction processes, but to accept complexity as a productive condition capable of opening new fields of action for the architect. In this case, hybridisation is oriented towards fields of research and experimentation connected with architecture – artificial intelligence, materials science, strategic anticipation, and practices of civic engagement and social transformation – with the aim of expanding the project's capacity to read, interpret, and orient uncertain conditions. From this perspective, Alvin Toffler (1970) recalled that the ability to 'learn, unlearn, and relearn' constitutes a central competence in an unstable world. The 'divergent' assumes this identity plasticity: he or she does not defend the traditional perimeter of the discipline, but extends it towards fields in which architectural competencies can be transferred, reworked, and applied to broader problems. This stance is coherent with the pathways identified by Harriet Harriss (Harriss, Hyde and Marcaccio, 2020), particularly those of the 'Beyond', who operate beyond the conventional boundaries of the profession while nevertheless continuing to mobilise tools, methods, and capacities specific to architectural education.

The example of artificial intelligence is revealing. Rather than perceiving AI as a threat, some architects choose to 'enter the black box' of algorithms. Stanislas Chaillou[2], an architect and engineer specialised in machine learning, develops generative tools that intersect geometry and machine learning. Before him, other architects had worked in this field, such as Greg Lynn, the Paperless Studio at Columbia University in New York, or the practice fabric.ch in Switzerland, exploring digital and computational environments as new territories of design since the 2000s (Fig. 8).

Divergent hybridisation is also manifested in the transformation of matter itself. Timothée Boitouzet[3], trained in architecture and materials science with advanced training in architecture and materials science at MIT and Harvard University, has developed a process of molecular modification of wood to improve its mechanical and environmental properties (Figg. 9, 10). In this case, the architect does not act only on implementation, but on the material's very constitution. The 'divergent' does not seek to reduce uncertainty through control, but to integrate it as a productive condition; the augmentation of competencies becomes a lever of adaptation, positioning the architect as a mediator between complex systems rather than as the guarantor of coherence within a rigid disciplinary boundary.

Hybridisation as the ecosystem operator of infrastructural innovation | The figures of the 'convergent' and the 'divergent' do not represent mutually exclusive models or rigidly separate professional trajectories, since they derive from the same matrix: hybridisation understood as the expansion of competencies and the recomposition of the architect's roles. The difference lies in the way each figure addresses complexity: the 'convergent' orients hybridisation towards strengthening the technical, constructive, and decision-making mastery of the project; the 'divergent' instead orients it towards an opening to fields of research and experimentation connected with architecture, in which architectural competencies are transferred, reworked, and applied to new conditions.

In both cases, the architect expands his or her field of action, but according to different strategies: the 'convergent' seeks to reduce uncertainty by reconstructing continuity between conception, decision, and realisation; the 'divergent' assumes uncertainty as a productive condition and addresses it through translation between different forms of knowledge, tools, and systems. These two figures show that the infrastructural transformation of the architectural project concerns not only the organisation of the profession, but also the ways in which the project constructs relations among knowledge, responsibilities, and decisions. In this sense, hybridisation constitutes the central operator of the passage from fragmentation to recomposition. The analysis developed in the previous sections therefore leads to a relevant conceptual shift: architectural innovation cannot be reduced to the improvement of technical performance or the introduction of advanced digital tools, but must be understood as the transformation of the cognitive, organisational, and relational structures that make the project possible. From this perspective, the architectural project no longer appears as a finished object, but as a dynamic ecosystem composed of actors, norms, knowledge, technologies, material resources, and environmental conditions in continuous interaction.

Conceiving the project as an ecosystem means recognising that every design decision is situated within a network of interdependencies. This reading is connected to studies on complex systems (von Bertalanffy, 2012; Morin, 2007) and recalls the idea of the 'New Alliance' formulated by Prigogine and Stengers (1979), in which determinism and becoming, stability and uncertainty, are no longer understood as separate poles, but as co-present conditions in the production of knowledge. The project can therefore no longer be interpreted as a linear programme to be executed in a stable context; it becomes instead an evolutionary process, capable of adapting to changing conditions and of producing new configurations from the interaction between constraints, actors, and operative possibilities. Infrastructural innovation is situated precisely at this level: it modifies the

conditions through which the project organises knowledge, distributes responsibilities, and constructs decisions. Hybridisation operates as a device of 'reliance', because it makes it possible to bring back into relation what 'déliance' had separated: specialist competencies, technical tools, professional responsibilities, decision-making processes, and fields of intervention. What had produced fragmentation – specialisation, technicisation, and the diversification of competencies – can thus become, within an ecosystemic logic, the basis for a renewed capacity for design synthesis. In this sense, infrastructural innovation does not consist of adding further tools to the design process, but in transforming the conditions that allow the project to function as a system of relations. The architectural project thus becomes a cognitive and organisational infrastructure in transformation: not only the place in which a spatial solution is produced, but the operative dispositif through which knowledge, actors, and decisions are recomposed in order to address contemporary complexity.

Scientific contributions and implications | The first contribution of this essay to debates on architectural innovation lies in shifting attention from innovation as a formal, material, or technological outcome to innovation as the transformation of the conditions of project production. Whereas in architecture innovation is traditionally associated with form, materials, or technology, this essay proposes to requalify it as an infrastructural transformation of the design process, locating it no longer in the object, but in the conditions of its production.

The second contribution concerns the conceptualisation of an infrastructural transformation articulated around the three dimensions of framework, method, and identity, within an analytical grid that makes it possible to connect regulatory mutations, methodological evolutions, and professional recompositions within a coherent model.

The third contribution lies in the formalisation of a transferable model: the archetypal figures of the 'convergent' and the 'divergent' constitute analytical tools for interpreting professional trajectories in different national contexts and offer a reading framework adaptable to other disciplines confronted with analogous processes of fragmentation and hybridisation.

The implications of this reading concern, first and foremost, architectural education. If innovation is situated at an infrastructural level, teaching cannot be limited to the transmission of technical tools liable to rapid obsolescence, but must instead strengthen competencies capable of supporting the project in conditions of complexity: systemic thinking, the capacity for synthesis, process management, adaptability, collaboration, and communication. In this direction, Harriet Harriss underlines the importance of transferable skills such as communication, problem-solving, and organisation (Harriss, Hyde and Marcaccio, 2020).

This essay also opens up a reflection on project governance: conceiving the project as an ecosystem implies rethinking the distribution of responsibilities and the modes of coordination among actors, knowledge, and decisions. The centrality of the architect can no longer be defined by a stable hierarchical position, but by the capacity to construct syntheses among complex systems, making legible the relations between technical constraints, environmental concerns, social responsibilities, and design choices.

At the professional level, this approach opens up the possibility of redefining the professional profile: architects are no longer only producers of built forms, but can act as mediators among competencies, strategists of the design process, and operators of 'reliance'. This evolution requires the institutional recognition of 'expanded' professional pathways, in which architectural competencies are transferred, reworked, and applied beyond the traditional boundaries of design practice.

Finally, infrastructural innovation requires the construction of new alliances: not a single alliance between disciplines, but a plurality of collaborations among scientific, technical, social, and cultural fields. Within this framework, architecture does not assume a dominant position, but operates as an interface capable of bringing knowledge, actors, and responsibilities into relation, contributing to the transformation of the project into a space for the recomposition of complexity.

Perspectives and conclusions | The analysis developed here opens three main directions for further investigation. The first concerns the possibility of conducting international comparative studies, useful for verifying how the figures of the 'convergent' and the 'divergent' assume different configurations in relation to cultural, regulatory, and professional contexts. The second concerns the integration of the qualitative approach with quantitative analyses based on available data on the profession, in order to observe more precisely the evolution of professional pathways, the distribution of commissions, the diversification of competencies, and the displacement of decision-making roles. The third concerns education: the proposed perspective could be tested in schools of architecture through studios oriented towards scenario building, teaching activities integrated across different disciplines, and projects conceived as experimental ecosystems of actors, knowledge, and responsibilities. The reflection starts from a single observation: the contemporary crisis of architecture does not primarily derive from a deficit of technical innovation, but from the progressive fragmentation of the cognitive, organisational, and identity structures that orient the design process. By recalling the notion of 'déliance' (Bolle de Bal, 2003) and the paradigm of simplification (Morin, 2005), the analysis has shown how the increase in socio-ecological complexity – expressed through the multiplication of environmental regulations, the hyperspecialisation of competencies, and digital technicisation – has contributed to separating responsibilities, knowledge, and decision-making fields, weakening the profession's capacity to produce synthesis.

The central hypothesis of the contribution is that this condition requires not further innovation in the objects produced, but a transformation of the conditions through which the project is conceived, organised, and realised. From this perspective, infrastructural innovation does not concern only tools, materials, or performance, but the ways in which the project constructs relations among actors, competencies, constraints, and decisions. The exploration of the concept of hybridisation (Halpern, 2020) has made it possible to recognise a dynamic process of expanding competencies and recomposing roles, and the archetypal figures of the 'convergent' and the 'divergent' have been proposed as two expressions of this same transformative matrix: the first oriented towards consolidating technical and constructive mastery, the second towards opening towards fields of research and experimentation connected with architecture. Hybridisation therefore appears as a systemic lever capable of transforming fragmentation into a possibility of recomposition, enabling the passage from 'déliance' to 'reliance' without eliminating complexity, but by organising it within new relations among knowledge, responsibilities, and practices. Considered as an ecosystem, the architectural project is no longer only a formal outcome or a technical performance, but a cognitive and organisational infrastructure in transformation, capable of integrating interdependencies, uncertainties, and a multiplicity of actors.

The contribution thus proposes a reading of the architectural project as an evolving relational and organisational dispositif. Infrastructural innovation lies in the capacity to reconfigure frameworks, methods, and professional identities, making the project a space in which complexity can be interpreted, coordinated, and oriented. This approach makes it possible to move beyond the opposition between control of the process and openness to uncertainty: design action is not abandoned, but situated within a more conscious reading of the relations among actors, constraints, competencies, and decisions.

The research nevertheless has certain limitations. It is based primarily on a qualitative and conceptual analysis, constructed through scientific literature, sector data, and the observation of professional practices. This approach enables the formalisation of an interpretative model, but does not constitute exhaustive empirical validation. The figures of the 'convergent' and the 'divergent' should therefore be understood as analytical tools, not as established statistical categories. Moreover, the study remains predominantly focused on European and North American contexts; comparative investigations in other cultural, regulatory, and professional contexts would be necessary to verify the transferability of the model. In light of these limits, the formalisation of infrastructural innovation requires further methodological development. In-depth case studies, quantitative investigations, and pedagogical experiments could enable the effects of hybridisation on project governance, the distribution of responsibilities, and the transformation of architectural education to be assessed more precisely. Despite these limits, the analysis confirms that the ongoing transformation cannot be understood through technical performance indicators alone and requires a profound recomposition of the architect's role in a world characterised by uncertainty and interdependence. The issue is not to restore a lost centrality, nor to withdraw in the face of complexity, but to redefine the conditions of design action. Within this horizon, infrastructural innovation enables the architectural project to become a space for the construction of new alliances, capable of articulating mastery and openness, stability and transformation.

Notes

1) For more information, see the webpage: espazium.ch/fr/artikel/architectures-afterlife-breaking-profession-breaking-planet [Accessed 29 March 2026].

2) For more information, see the webpage: stanislaschaillou.com/main.html [Accessed 29 March 2026].

3) For more information, see the webpage: woodoo.com [Accessed 29 March 2026].

References

Barosio, M., Boutsen, D., Čeko, A., De Loof, H., De Walsche, J., Gomes, S., Harriss, H., Marcaccio, R., Roth-Čerina, M., Sentieri, C., Sashore, N., Vannucchi, F. and Van Reusel, H. (2024), *Architecture's Afterlife – The multisector impact of an architecture degree*, Routledge, London. [Online] Available at: doi.org/10.4324/9781003411574 [Accessed 29 March 2026].

Beck, U. (2008), *La société du risque – Sur la voie d'une autre modernité*, Éditions Flammarion, Paris.

Biau, V. (2020), *Les architectes au défi de la ville néolibérale*, Editions Parenthèses, Marseille.

Biau, V. and Macaire, E. (2024), "1001 manières d'être architecte", in *education.espazium.ch*, 28/10/2024. [Online] Available at: education.espazium.ch/fr/publication-universitaire/1001-manieres-d-etre-architecte [Accessed 29 March 2026].

Biau, V., Macaire, É., Aristide, C., Balti, S., Bouysse-Mesnage, S., Dadour, S., Breton, C., Darrieus, M., Decommer, M., Dujardin, B., Devisme, L., Durand, B., Escar-Otin, N., Flamand, A., Geisler, É., Genyk, I., Hardouin, O., Horsch, B., Hunout, G., Manola, T., Mougey, M., Nordström, M., Ouvrard, P., Pham, F., Proust, S., Roux, J.-M., Sadokh, C., Tribout, S., Vandenbunder, J., Védrine, C., Veillerot, M. and Veillon, O. (2024), *Pratiques architecturales émergentes, méconnues ou atypiques et besoins en formation*. [Online] Available at: hal.science/hal-04663160v1 [Accessed 29 March 2026].

Bolle de Bal, M. (2003), "Reliance, Déliance, Liance – Émergence de trois notions sociologiques", in *Société*, vol. 80, pp. 99-131. [Online] Available at: shs.cairn.info/revue-societes-2003-2-page-99?lang=fr&tab=texte-integral [Accessed 29 March 2026].

Bötticher, K. (1844-1852), *Die Tektonik der Hellenen – Die Lehre der tektonischen Kunstformen*, Ferdinand Riegel, Potsdam.

Buckminster Fuller, R. (2010), *Operating Manual for Spaceship Earth*, Lars Müller Publisher, Zurich.

Buckminster Fuller, R. and Applewhite, E.-J (1975), *Synergetics – Explorations in the Geometry of Thinking*, Macmillan, New York.

Dauge, Y. (2004), *Métiers de l'architecture et du cadre de vie – Les architectes en peril*, Rapport d'information n° 64 (2004-2005), Commission des affaires culturelles, Sénat Français. [Online] Available at: senat.fr/rap/r04-064/r04-064.html?utm_source=chatgpt.com [Accessed 8 May 2026].

Diez, L. (2024), "Conception-réalisation versus architecte-artisan", in *D'architectures*, vol. 316, p. 28. [Online] Available at: darchitectures.com/magazine/rubriques/point-de-vue/5716-conception-realisation-versus-architecte-artisan.html?utm_source=chatgpt.com [Accessed 29 March 2026].

Dunne, A. and Raby, F. (2013), *Speculative Everything – Design, Fiction, and Social Dreaming*, Cambridge-London, MIT Press. [Online] Available at: readings.design/PDF/speculative-everything.pdf [Accessed 29 March 2026].

Durand, B. (2023), *Fabrication d'une 'architecture durable' en France (2000-2010)*, Doctoral Thesis, Université Paris-Est, France. [Online] Available at: theses.hal.science/tel-04353097 [Accessed 29 March 2026].

European Commission – Directorate-General for Research and Innovation (2021), *Industry 5.0 – Towards a Sustainable, Human-Centric and Resilient European Industry*, Publications Office of the European Union. [Online] Available at: data.europa.eu/doi/10.2777/308407 [Accessed 8 May 2026].

Geels, F. W. (2002), "Technological transitions as evolutionary reconfiguration processes – A multi-level perspective and a case-study", in *Research Policy*, vol. 31, issue 8-9, pp.1257-1274. [Online] Available at: doi.org/10.1016/S0048-7333(02)00062-8 [Accessed 29 March 2026].

Halpern, G. (2020), *Tous Centaures! – Eloge de l'Hybridation*, Le Pommier, Paris.

Harriss, H., Hyde, R. and Marcaccio, R. (2020), *Architects after Architecture – Alternative Pathways for Practice*, Routledge, New York.

Hudin, A. and Veran, C. (2012), "Labels, certifications, normes pour l'aménagement durable – L'urgence d'instaurer un langage commun", in *lemoniteur.fr*, 14/12/2012. [Online] Available at: lemoniteur.fr/article/labels-certifications-normes-pour-l-amenagement-durable-l-urgence-d-instaurer-un-langage-commun.1468789 [Accessed 29 March 2026].

Jonas, H. (1990), *Le principe de responsabilité – Une éthique pour la civilisation technologique*, Éditions du Cerf, Paris.

Kirby, D. (2010), "The Future is Now – Diegetic Prototypes and the Role of Popular Films in Generating Real-World Technological Development", in *Social Studies of Science*, vol. 40, issue 1, pp. 41-70. [Online] Available at: doi.org/10.1177/0306312709338325 [Accessed 8 May 2026].

Landes-Rechnungshof Vorarlberg (2003), Prüfbericht über das Büro für Zukunftsfragen, Bregenz. [Online] Available at: lrh-v.at/report/buro-fur-zukunftsfragen?utm_source=chatgpt.com [Accessed 29 March 2026].

Latour, B. (2015), *Face à Gaïa – Huit conférences sur le Nouveau Régime Climatique*, La Découverte, Paris.

Loorbach, D. (2010), "Transition Management for Sustainable Development – A Prescriptive, Complexity-Based Governance Framework", in *Governance | An International Journal of Policy, Administration, and Institutions*, vol. 23, issue 1, pp. 161-183. [Online] Available at: doi.org/10.1111/j.1468-0491.2009.01471.x [Accessed 29 March 2026].

Lovelock, J. (2017), *La Terre est un être vivant – L'hypothèse Gaïa*, Flammarion, Paris.

Meadows, D. H., Meadows, D. L., Randers, J. and Behrens, W. (1972), *The Limits to Growth – A report for the Club of Rome's Project on the Predicament of Mankind*, Universe Books, New York.

Morin, E. (2015), *Penser global – L'humain et son univers*, Éditions Robert Laffont, Paris.

Morin, E. (2007), *L'an I de l'ère écologique – La Terre dépend de l'homme qui dépend de la Terre*, Tallandier, Paris.

Morin, E. (2005), *Introduction à la pensée complexe*, Seuil, Paris.

Morin, E. (2004), *La Méthode – 6* – Éthique, Seuil, Paris.

Morin, E. (2000), *Les sept savoirs nécessaires à l'éducation du futur*, Seuil, Paris.

Nourrigat, E. (1999), *Guetteur 01 – L'architecture comme prétexte*, Diploma in Architecture, École d'Architecture de Montpellier, France.

Nova, N. (2014), *Futurs? – La panne des imaginaires technologiques*, Les Moutons Électriques, Montélimar.

Piaget, J. (1972), "L'épistémologie des relations interdisciplinaires", in OCDE (ed.), *L'interdisciplinarité – Problèmes d'enseignement et de recherche dans les universités*, OCDE, Paris, pp. 131-144.

Prigogine, I. and Stengers, I. (1979), *La Nouvelle Alliance – Métamorphose de la science*, Gallimard, Paris.

Schot, J. and Geels, F-W. (2008), "Strategic niche management and sustainable innovation journeys – Theory, findings, research agenda, and policy", in *Technology Analysis & Strategic Management*, vol. 20, issue 5, pp 537-554. [Online] Available at: doi.org/10.1080/09537320802292651 [Accessed 29 March 2026].

Stacher, S. (2023), *Architecture en temps de crise – Stratégies actuelles et historiques pour la conception de 'mondes nouveaux'*, Birkhäuser Architecture, Basel.

Tansley, A. G. (1935), "The use and abuse of vegetational concept and terms", in *Ecology | Ecological Society of America*, vol. 16, issue 3, pp. 284-307. [Online] Available at: doi.org/10.2307/1930070 [Accessed 29 March 2026].

Toffler, A. (1970), *Future Shock*, Random House, New York.

UNDP (2018), *Foresight Manual – Empowered Futures for the 2030 Agenda*, UNDP Global Centre for Public Service Excellence. [Online] Available at: undp.org/sites/g/files/zskgke326/files/publications/UNDP_ForesightManual_2018.pdf [Accessed 29 March 2026].

von Bertalanffy, L. (2012), *Théorie générale des systèmes*, Dunod, Paris.

AGATHÓN – International Journal of Architecture, Art and Design | n. 19 | 2026 | pp. 36-49
ISSN print: 2464-9309 – ISSN online: 2532-683X | doi.org/10.69143/2464-9309/1922026

ARTICLE INFO

Received 02 March 2026
Revised 18 May 2026
Accepted 21 May 2026
Published 30 June 2026

INFRASTRUTTURE TRA SOSTENIBILITÀ E NECESSITÀ
Progettazione ambientale e approccio transcalare

INFRASTRUCTURE BETWEEN SUSTAINABILITY AND NECESSITY
Environmental design and a trans-scalar approach

Andrea Tartaglia, Luigi Alini

ABSTRACT

Il contributo interpreta l'Obiettivo di Sviluppo Sostenibile n. 9 come occasione per ripensare i processi di infrastrutturazione del territorio oltre il modello monofunzionale e settoriale delle infrastrutture grigie. A partire dal quadro teorico della Progettazione Tecnologica e Ambientale il saggio propone una lettura transcalare e prestazionale dell'infrastruttura, intesa non solo come opera tecnica, ma come dispositivo capace di produrre servizi, valori ecosistemici e benefici sociali nel medio-lungo periodo. La riflessione è sviluppata attraverso tre esperienze in Italia: il nuovo PTCP della Provincia di Lodi, in cui i valori socioeconomici sono messi in relazione con quelli ecosistemici; le Linee guida per la qualità ambientale e sociale degli interventi dell'Agenzia del Demanio, orientate alla valutazione lungo il ciclo di vita; la sperimentazione su 'Arundo donax' nella Riserva Naturale Orientata Saline di Priolo, che trasforma una specie infestante in risorsa per infrastrutture leggere e reversibili. I risultati evidenziano la necessità di passare da una logica della possibilità tecnica a una cultura della necessità progettuale, capace di orientare scelte infrastrutturali multifunzionali, verificabili e trasferibili.

The contribution interprets Sustainable Development Goal no. 9 as an opportunity to rethink territorial infrastructuring processes beyond the mono-functional and sectoral model of grey infrastructure. Starting from the theoretical framework of Technological and Environmental Design, the essay proposes a trans-scalar and performance-based reading of infrastructure, understood not only as technical work but also as a device capable of producing services, ecosystem values, and social benefits over the medium- to long-term. The reflection is developed through three experiences in Italy: the new PTCP of the Province of Lodi, in which socio-economic values are related to ecosystem values; the Guidelines for the environmental and social quality of interventions developed by the Agenzia del Demanio, oriented towards assessment throughout the life cycle; and the experimentation with 'Arundo donax' in the Saline di Priolo Oriented Nature Reserve, which turns an invasive species into a resource for lightweight and reversible infrastructure. The results highlight the need to move from a logic of technical possibility to a culture of design necessity, capable of orienting multifunctional, verifiable, and transferable infrastructural choices.

KEYWORDS

infrastrutture sostenibili, progettazione ambientale, approccio transcalare, infrastrutture verdi e blu, servizi ecosistemici

sustainable infrastructure, environmental design, trans-scalar approach, green and blue infrastructure, ecosystem services

Andrea Tartaglia, Architect and PhD, is a Full Professor at the Department of Humanities, University of Catania (Italy). He carries out teaching, research, consultancy, and design activities in complex scenarios, with reference to the technological field and its socio-environmental, procedural, and regulatory correlations. In particular, his attention focuses on innovation articulated across three levels: regulatory / procedural, the qualification of processes and products, and environmental sustainability. E-mail: andrea.tartaglia@unict.it

Luigi Alini, Architect and PhD, is a Full Professor at the Department of Civil Engineering and Architecture, University of Catania (Italy). His research focuses on the innovative use of natural materials and construction techniques from the Mediterranean tradition. E-mail: luigi.alini@unict.it

L'evoluzione dei modelli di vita sociale, sempre più influenzati da fattori culturali, economici e nuove tecnologie, ha determinato un radicale mutamento delle tradizionali infrastrutture urbane e degli spazi in cui l'uomo 'organizza' le sue azioni: la trasformazione e l'uso del territorio si configurano sempre più come luogo di relazioni, di servizi e non solo. «Lo spazio in cui viviamo (città o campagna) è prodotto dall'uomo perché è – per definizione – uno spazio sociale. Risulta da processi economici, da decisioni politiche, da fattori culturali, da linee di forza che si combinano variamente modificando gli equilibri fra il pubblico e il privato, il religioso e il laico, il funzionale e il simbolico» (Settis, 2011, p. 52), uno spazio sociale in continua evoluzione la cui trasformazione può dipendere da una visione progettuale e strategica piuttosto che dal caso o ancora dalla degenerazione prodotta dall'abbandono.

L'ineluttabilità e centralità dell'azione umana, insieme alla necessità che tale azione sia governata da logiche di uso e non di consumo che traguardino verso le future generazioni, è confermata dalla centralità del tema infrastrutture all'interno dell'Agenda 2030 dell'ONU (UN, 2020). Infatti l'azione antropica più evidente sui territori si esplicita normalmente attraverso i processi di infrastrutturazione con azioni necessarie a sostenere lo sviluppo e a rispondere all'evolversi delle domande ed esigenze delle popolazioni; a questo tema, necessario a garantire la qualità della vita, sono dedicati esplicitamente ben tre target all'interno del SDG 9, e in particolare:

– target 9.1, finalizzato allo sviluppo di infrastrutture di qualità, affidabili, sostenibili e resilienti, incluse quelle regionali e transfrontaliere, a supporto dello sviluppo economico e del benessere umano, con particolare attenzione all'accessibilità equa e universale;

– target 9.4, orientato all'adeguamento delle infrastrutture e alla riconversione sostenibile dei sistemi industriali, attraverso un uso più efficiente delle risorse e una maggiore adozione di tecnologie e processi puliti e ambientalmente compatibili, secondo le capacità dei singoli Paesi;

– target 9.a, volto a favorire infrastrutture sostenibili e resilienti nei Paesi in via di sviluppo mediante un sostegno finanziario, tecnologico e tecnico rafforzato, con particolare attenzione ai Paesi meno sviluppati, a quelli senza sbocco sul mare e ai piccoli Stati insulari.

Questi target confermano da un lato l'innegabile esigenza della progressiva azione di infrastrutturazione come condizione ineludibile per un mondo più equo e più giusto, ma dall'altro esprimono una forte critica ai modelli tradizionali che richiedono una svolta (Fanzini, Tartaglia and Riva, 2019; UNOPS, 2020) in termini di sostenibilità e di qualità anche nel lungo periodo, come sottolineato con l'introduzione del termine 'affidabili'. Tuttavia il perseguimento degli obiettivi sopra richiamati non può essere ricondotto a un'unica traiettoria operativa, né affidato a un modello unitario fortemente specialistico. Gli stessi target dell'SDG 9 evidenziano infatti una duplice direzione di lavoro: da un lato lo sviluppo e l'implementazione di nuovi modelli infrastrutturali, come indicato dal target 9.1, dall'altro l'adeguamento di sistemi già esistenti e, in molti casi, fortemente consolidati, come richiesto dal target 9.4. Si tratta di obiettivi ancora lontani dall'essere pienamente conseguiti e che richiedono un impegno significativo sul piano programmatorio, progettuale e attuativo (UN, 2020). Alla luce di tali premesse il contributo intende dimostrare come l'infrastrutturazione del territorio possa essere ripensata attraverso un approccio transcalare, prestazionale e sistemico, capace di integrare qualità ambientale, servizi ecosistemici e utilità sociale. Il saggio è articolato in quattro sezioni: ricostruzione critica dell'evoluzione dei modelli infrastrutturali; analisi della dimensione programmatoria attraverso il PTCP di Lodi; verifica del passaggio dalla programmazione al progetto mediante le Linee guida dell'Agenzia del Demanio; discussione del criterio di necessità attraverso la sperimentazione nella Riserva di Priolo.

I tre casi sono stati scelti in quanto rappresentano tre momenti e scale diversi del processo di infrastrutturazione ma, poiché sono accomunati dall'essere stati sviluppati in coerenza con l'approccio metodologico e con gli strumenti della Progettazione tecnologica e ambientale dell'architettura, permettono di esplicitare chiaramente come tale approccio si possa declinare senza soluzione di continuità nelle diverse situazioni per garantire la necessaria coerenza tra obiettivi e risultati per rispondere pienamente alle sfide della contemporaneità che si ritrovano nell'Agenda 2030 delle Nazioni Unite.

L'interesse scientifico risiede nella proposta di una chiave interpretativa trasferibile, utile a orientare scelte infrastrutturali non solo sostenibili, ma necessarie, misurabili e coerenti con i target definiti all'interno degli SDG. In sintesi i casi che vengono presentati confermano l'ipotesi che un'infrastruttura non è sostenibile solo quando riduce gli impatti ma quando dimostra necessità, multifunzionalità, coerenza ecosistemica e verificabilità prestazionale.

Infrastrutture in evoluzione | Tradizionalmente le infrastrutture (oggi inquadrate nella definizione di 'infrastrutture grigie') nascevano per rispondere a una specifica esigenza; la loro realizzazione seguiva logiche fortemente funzionalistiche e specialistiche che raramente si confrontavano con il tema degli impatti o delle interferenze se non quando si relazionavano con infrastrutture o sistemi di pari livello e importanza. Si tratta di un modello ormai in declino i cui effetti sono stati e vengono tuttora affrontati con l'introduzione di strumenti quali la Valutazione Ambientale Strategica (VAS), la Valutazione di Impatto Ambientale (VIA) e/o la Valutazione di Incidenza Ambientale (VIncA), il cui obiettivo è accompagnare i processi e le scelte per limitare, se non annullare, gli effetti ambientali negativi prodotti dalle azioni antropiche o individuare interventi compensativi in grado di riequilibrare eventuali impatti prodotti.

Negli ultimi anni sono stati introdotti ulteriori strumenti che gestiscono meglio la sostenibilità di un'opera, in particolare delle grandi infrastrutture, come il Protocollo Envision che «[…] consente di valutare l'efficacia dell'investimento, le ricadute dell'opera sull'ecosistema, la durabilità e i vantaggi dell'opera sulla qualità della vita dei cittadini, la capacità di attrarre capitali privati e generare economia» (Alini and Martino, 2023, p. 268). Tale protocollo è di facile applicazione ma presenta dei limiti che trovano nel concetto di 'consumo di suolo' la sintesi più efficace degli effetti ambientali negativi l'intervento antropico produce; si tratta infatti di un modello che comunque 'consuma' le risorse, che porta alla perdita, in molti casi definitiva, di opportunità per le generazioni future. L'alternativa proposta negli ultimi anni si è focalizzata sulle cosiddette 'infrastrutture verdi e blu', cioè sistemi complessi composti da elementi naturali e/o artificiali che si caratterizzano per un'intrinseca multifunzionalità e per la capacità non solo di rispondere a esigenze prettamente funzionali – come le infrastrutture grigie, anche se non sempre con la stessa efficacia – ma anche di contribuire alla creazione, al recupero o al potenziamento dei cosiddetti servizi ecosistemici (Mussinelli et alii, 2018), cioè benefici gratuiti ma necessari al benessere, alla salute, all'economia e soprattutto alla sopravvivenza dell'essere umano stesso.

La costruzione e l'implementazione di infrastrutture verdi è un approccio che, formalizzato circa trent'anni fa negli Stati Uniti d'America, è successivamente diventato uno degli elementi caratterizzanti anche le politiche europee, non solo per la mitigazione e l'adattamento agli effetti dei cambiamenti climatici, ma anche come nuovo modello di gestione dei territori, sia di maggiore valenza naturalistica sia urbanizzati; tale modello ha portato all'individuazione di sistemi a rete già presenti da salvaguardare, valorizzare e/o completare. Le reti ecologiche diventano così un elemento centrale nella pianificazione su larga scala non solo per garantire la qualità degli ecosistemi naturali, ma anche per conservare sistemi a rete che vedono nella continuità delle relazioni ecologiche un elemento ineludibile per la loro efficacia e 'sopravvivenza'.

Tuttavia l'infrastrutturazione verde, almeno con le tecnologie attuali, non può essere considerata totalmente alternativa a quella grigia. Al momento infatti convivono tre visioni spesso considerate alternative: il modello tradizionale a maggiore impatto ambientale accompagnato dai citati strumenti di valutazione finalizzati al contenimento degli impatti; Soluzioni basate sulla Natura (NbS) che propongono progettualità maggiormente resilienti e sostenibili in grado di sostituirsi alle infrastrutture grigie o di contenerne gli effetti negativi; processi di infrastrutturazione finalizzati prioritariamente a ricostruire ecosistemi in grado di fornire nuovi servizi ecosistemici o a recuperare la loro erogazione in contesti sottoposti a pressioni antropiche che ne limitavano l'efficacia. La letteratura recente evidenzia inoltre che le infrastrutture verdi, soprattutto nei contesti climaticamente fragili, devono essere valutate non solo per la loro presenza fisica o per il valore paesaggistico ma per la capacità di costruire ecologie operative, sostenibili sul piano idrico, manutentivo e prestazionale (Moscatelli and Raffa, 2023; D'Ambrosio, Rigillo and Tersigni, 2021).

Rispetto alla terza tipologia esistono poi anche modelli e approcci totalmente o parzialmente 'grigi' che cercano comunque di rispondere alle criticità climatico-ambientali: si pensi ad esempio agli impianti per il sequestro di carbonio o di anidride carbonica non solo da fonti industriali ma direttamente dall'atmosfera per poi stoccarlo nel sottosuolo anche attraverso processi di mineralizzazione (Pastero, 2023) o convertendolo per altri usi industriali. In questo senso sono già operativi diversi impianti anche di carattere commerciale che hanno l'obiettivo di ripagarsi sia attraverso la vendita di crediti di carbonio sia producendo materiali industriali o nuovi carburanti sintetici.[1]

Le sfide climatiche, ambientali e sociali non possono essere affrontate attraverso un'unica soluzione, applicabile indistintamente a ogni contesto

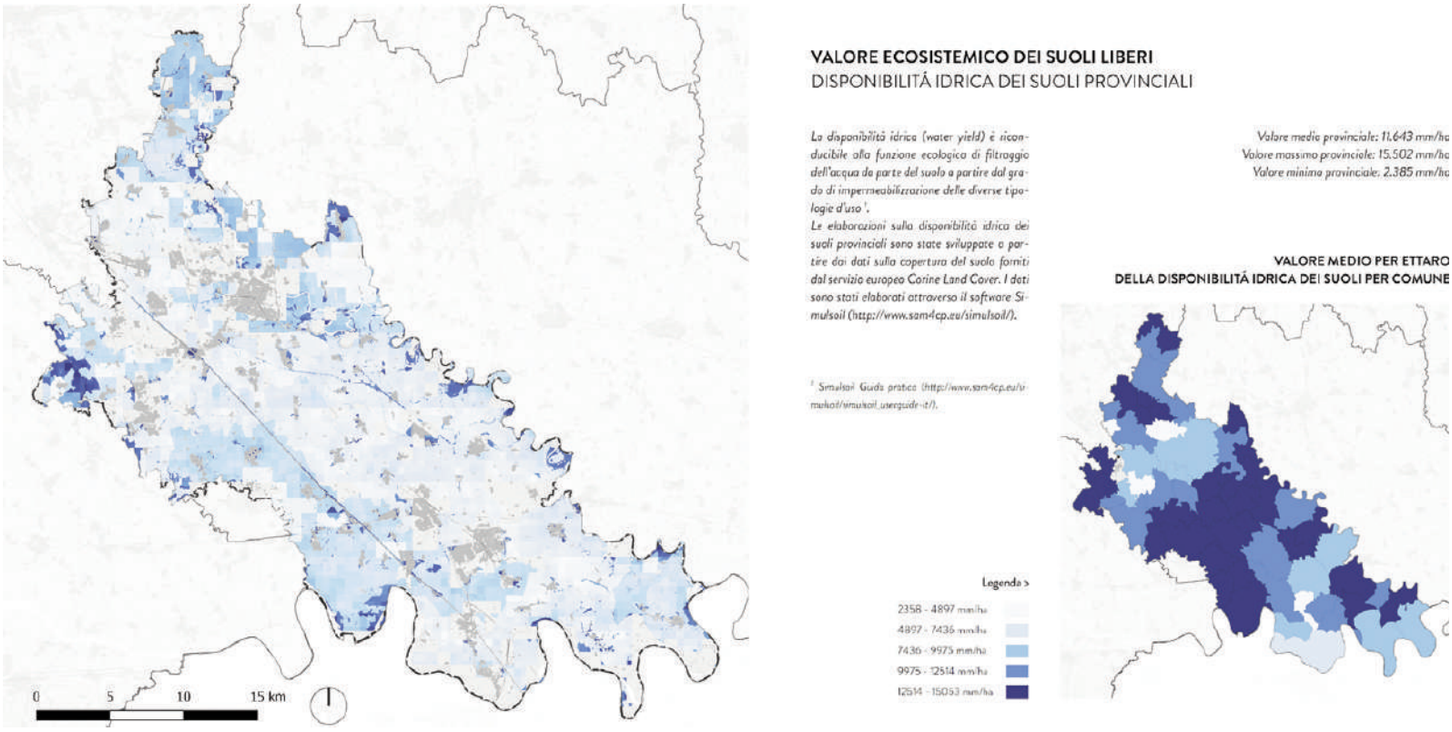


Fig. 1 | Water availability of soils in the territory administered by the Province of Lodi (source: Strategic document and guidelines for the construction of the new PTCP of the Province of Lodi, 2021).

ma richiedono di rivedere le prassi consolidate: non basta sostituire le infrastrutture grigie con quelle verdi poiché occorre valutare anche la necessità del servizio, la prestazione ecosistemica e la coerenza territoriale. Si tratta di favorire, come verrà meglio spiegato di seguito, approcci transdisciplinari e transcalari, capaci di garantire continuità tra gli indirizzi strategici sovranazionali, gli strumenti di programmazione e pianificazione e le azioni locali di dettaglio.

In questa prospettiva le soluzioni basate sulla natura non possono essere considerate semplici dispositivi verdi da aggiungere a modelli infrastrutturali esistenti, ma componenti progettuali multiscalari in grado di connettere obiettivi ambientali, prestazioni ecosistemiche e strategie dell'Agenda 2030 (Ingaramo et alii, 2023; Grabowski, McPhearson and Pickett, 2023). Ciò implica la necessità di operare su più livelli decisionali e progettuali, rivedendo modelli programmatori e pianificatori che, soprattutto in Italia, restano spesso ancorati a logiche settoriali e specialistiche. Tale approccio è ribaltato nei tre casi studio selezionati in cui si superano le logiche tradizionali caratterizzate dalla contrapposizione tra infrastrutture grigie e infrastrutture verdi, sostituendole con una 'matrice' interpretativa fondata su tre passaggi: scala territoriale-programmatoria, scala del processo decisionale / progettuale, scala del manufatto leggero e reversibile.

Programmare l'infrastrutturazione | Particolarmente interessante è stato l'approccio adottato per la costruzione del recente Piano Territoriale di Coordinamento Provinciale (PTCP)[2] approvato dalla Provincia di Lodi in cui la costruzione della proposta e dei contenuti è stata sviluppata integrando ragionamenti di carattere socio-economico (tipici della pianificazione urbanistica) con aspetti socio-ambientali (tipici della progettazione ambientale) così da costruire un quadro interpretativo in grado di comparare gli aspetti infrastrutturali e di sviluppo economico con elementi di carattere ecosistemico.

La peculiarità del PTCP di Lodi non risiede nell'aver introdotto semplicemente azioni per il miglioramento delle caratteristiche ambientali del territorio, attraverso ad esempio strumenti di incentivazione nell'uso di NbS o di contrasto del consumo di suolo, ma nell'aver modificato il modo in cui il territorio veniva letto e interpretato cercando di confrontare i valori socioeconomici e di attrattività produttiva con i valori ecosistemici.

Ad esempio, sono state sviluppate sulla disponibilità idrica dei suoli provinciali (Fig. 1) a partire dai dati sulla copertura del suolo forniti dal servizio europeo Corine Land Cover e poi elaborati attraverso il software Simulsoil. La disponibilità idrica in questa prospettiva non rappresenta solo un indicatore ambientale ma una condizione infrastrutturale che connette qualità dei suoli, capacità di adattamento climatico, continuità ecologica e benessere delle comunità insediate (Angelucci and Shatvoryan, 2025). Similmente le elaborazioni sullo stoccaggio di carbonio dei suoli provinciali (Fig. 2) sono state sviluppate secondo il modello InVEST 'Carbon Storage and Sequestration; in questo senso il suolo non può essere assunto come semplice superficie disponibile alla trasformazione ma come componente progettuale primaria, dotata di prestazioni ecologiche, idrologiche e insediative che incidono sulla qualità complessiva delle strategie infrastrutturali (Tesoriere, 2023), valorizzando le 'ricchezze' e le risorse locali e mettendo allo stesso livello aspetti dell'economia tradizionale con quelli legati ai valori ecosistemici, anche in termini di sicurezza e di adattamento al cambiamento climatico dei territori.

La sovrapposizione anche cartografica di questi elementi di valore ha permesso di evidenziare un quadro molto diverso del territorio in cui non esistevano più realtà attrattive e realtà che subivano processi di abbandono, realtà di interesse economico e territori di scarso valore; al contrario si è potuto constatare come ogni territorio compartecipasse con modalità diverse a valorizzare il territorio provinciale portando risorse molto diversificate ma ugualmente importanti soprattutto se analizzate in una prospettiva temporale di medio e lungo termine. La natura e lo spazio aperto assumono così il ruolo di capitale territoriale, non riducibile a riserva ambientale o vincolo paesaggistico, capace di orientare processi di transizione ecologica e di ridefinire le gerarchie tra aree centrali, marginali e produttive (Lecardane, 2023).

Con tale approccio è stato possibile superare i tradizionali modelli competitivi tra territori, introducendo una visione collaborativa in cui i 'successi' di alcuni ambiti territoriali potevano e dovevano essere redistribuiti sull'intero territorio provinciale, al fine di valorizzare le specificità e le vocazioni locali entro una prospettiva di vantaggio comune e di perequazione. È stato inoltre possibile contenere la domanda di infrastrutture grigie, ridurre il consumo di suolo e favorire una significativa inversione di tendenza, affinché le scelte locali potessero concorrere proattivamente alla costruzione di utilità più ampie a livello provinciale, senza comprimere i margini di azione delle singole amministrazioni comunali.

L'idea, concretizzata nel documento finale approvato dalle Amministrazioni locali, era quella di definire un nuovo modello di gestione del territorio in cui i processi di sviluppo economico non fossero soltanto fattori generativi dell'infrastrutturazione verde, ma in cui la stessa infrastrutturazione verde potesse diventare motore di sviluppo e benessere locale, attivando processi virtuosi capaci di autoalimentarsi. Tale modello non escludeva l'infrastrutturazione grigia, ma ne circoscriveva il ricorso alle situazioni in cui essa risultasse necessaria, partico-

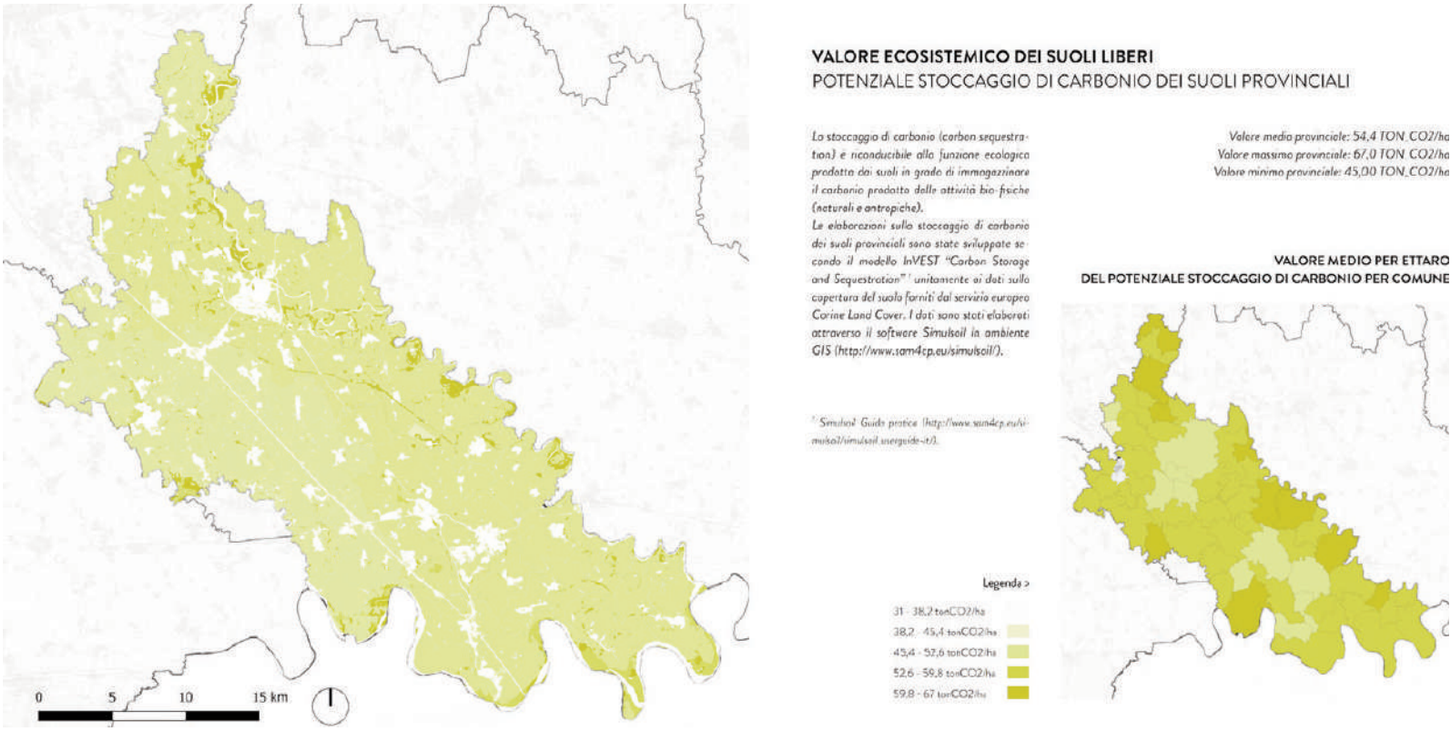


Fig. 2 | Potential carbon storage in soils in the territory administered by the Province of Lodi (source: Strategic document and guidelines for the construction of the new PTCP of the Province of Lodi, 2021).

larmente efficace e non sostituibile da modelli alternativi di intervento.

Le azioni a rete di scala provinciale sono state messe a sistema con gli interventi locali in una visione sistemica e transcalare propria della progettazione ambientale (Torricelli, 2025). Si è così cercato di superare gli specialismi settoriali, le segmentazioni operative e le separazioni tra le diverse scale di intervento che caratterizzano frequentemente i processi programmatori, pianificatori e progettuali, valorizzando una metodologia unitaria, successivamente declinabile nei diversi momenti e alle diverse scale attuative del PTCP. In questa prospettiva le logiche di lettura e di individuazione delle priorità a grande scala sono diventate anche criteri per la definizione delle alternative localizzative e progettuali a scala locale, in coerenza con le strategie generali del Piano.

È stato inoltre superato il tradizionale affiancamento tra il processo decisionale per la gestione del territorio e la VAS, solitamente chiamata a verificare la sostenibilità delle scelte, risultato ottenuto attraverso l'integrazione degli indicatori di VAS con quelli di monitoraggio dell'attuazione del Piano, rendendo i due processi strettamente interdipendenti. Tale impostazione risulta coerente con gli approcci più recenti alla gestione integrata delle risorse naturali, che richiedono di leggere suolo, acqua, vegetazione, energia e servizi ecosistemici come sistemi interconnessi e non come ambiti settoriali separati (Valente et alii, 2024). Il Piano si è così configurato come una vera azione di progettazione ambientale in cui il processo è diventato tutt'uno con il prodotto del PTCP.

Dalla programmazione al progetto | Il perseguimento dei target riferiti ai processi di infrastrutturazione del territorio non può tuttavia limitarsi a rinnovare i processi di pianificazione e programmazione ma, come già detto, deve introdurre a tutte le scale processi e strumenti in grado di garantire che non vi sia soluzione di continuità negli obiettivi tra la grande scala e il singolo intervento e che ogni specifica azione compartecipi alla costruzione di un più ampio scenario territoriale rinnovato nei contenuti qualitativi di carattere ambientale, ma anche sociali. Il progetto del verde e delle componenti ecosistemiche deve quindi essere interpretato come parte di una più ampia transizione progettuale, nella quale dispositivi spaziali, prestazioni ambientali e qualità d'uso concorrono alla definizione di nuove forme di infrastrutturazione sostenibile (Pirina, Comi and d'Abramo, 2024).

In questa prospettiva risulta particolarmente significativa una prima sperimentazione sviluppata dall'Agenzia del Demanio in collaborazione con la ricerca universitaria[3] che ha portato alla costruzione di uno strumento inizialmente concepito come supporto alla selezione degli interventi prioritari da finanziare e successivamente evoluto in un dispositivo capace di accompagnare l'intero processo, dallo sviluppo delle progettualità fino al monitoraggio in fase d'uso. La sua rilevanza risiede nella capacità di ampliare il campo di valutazione dei singoli interventi, integrando gli aspetti ambientali e sociali e superando una logica limitata ai soli obiettivi originariamente motivanti il finanziamento delle opere.

Tale impostazione risponde alla natura stessa degli SDG, in cui le dimensioni ambientali e sociali risultano strettamente interrelate quando il fine ultimo è il benessere umano nel lungo periodo. Le infrastrutture sostenibili generano infatti effetti che oltrepassano il perimetro dell'SDG 9, attivando sinergie con la gestione circolare dell'acqua, il metabolismo urbano, la qualità dello spazio abitato e l'adattamento climatico (Dessì et alii, 2025; Sposito and Mittersteiner, 2025). La sfida della ricerca condotta con l'Agenzia del Demanio è stata quindi quella di superare la settorialità dei diversi strumenti di certificazione – ambientali, energetici o riferiti al benessere – per costruire un dispositivo unitario, capace di integrare le richieste del modello ESG con gli obblighi derivanti dall'applicazione dei criteri DNSH, connessi all'impiego dei fondi PNRR e NextGenerationEU (Tartaglia et alii, 2024). Anche in questo caso l'obiettivo era oltrepassare gli approcci specialistici attraverso un sistema di indicatori di performance, corredato da modelli di calcolo e di verifica delle prestazioni, riferiti a molteplici dimensioni della qualità.

Lo strumento è stato così orientato a supportare in modo integrato gli interventi di infrastrutturazione finalizzati alla realizzazione di nuovi spazi per l'erogazione di servizi pubblici; in questa logica la qualità degli interventi non è stata intesa come semplice conformità agli standard normativi, bensì come capacità di conseguire obiettivi prestazionali più ambiziosi, calibrati in relazione alla complessità e alla dimensione delle progettualità, nonché alle specifiche caratteristiche e fragilità dei siti interessati. Ne deriva un armamentario metodologico con funzioni di indirizzo, valutazione e controllo, dotato di strumenti predittivi e di sistemi di indicatori per misurare e orientare le prestazioni ambientali e sociali delle opere lungo l'intero ciclo decisionale, progettuale e gestionale.

Lo strumento, denominato 'Linee guida per la qualità ambientale e sociale degli interventi' (Agenzia del Demanio, 2023), è stato strutturato secondo uno schema logico-formale pensato per facilitarne l'applicazione nelle diverse fasi del processo, dalla progettazione alla realizzazione, fino alla gestione e all'uso dei manufatti (Fig. 3). La sua impostazione associa agli obiettivi ambientali e sociali esempi di azioni e soluzioni tecniche che, pur riferendosi a specifici ambiti tematici, si caratterizza-

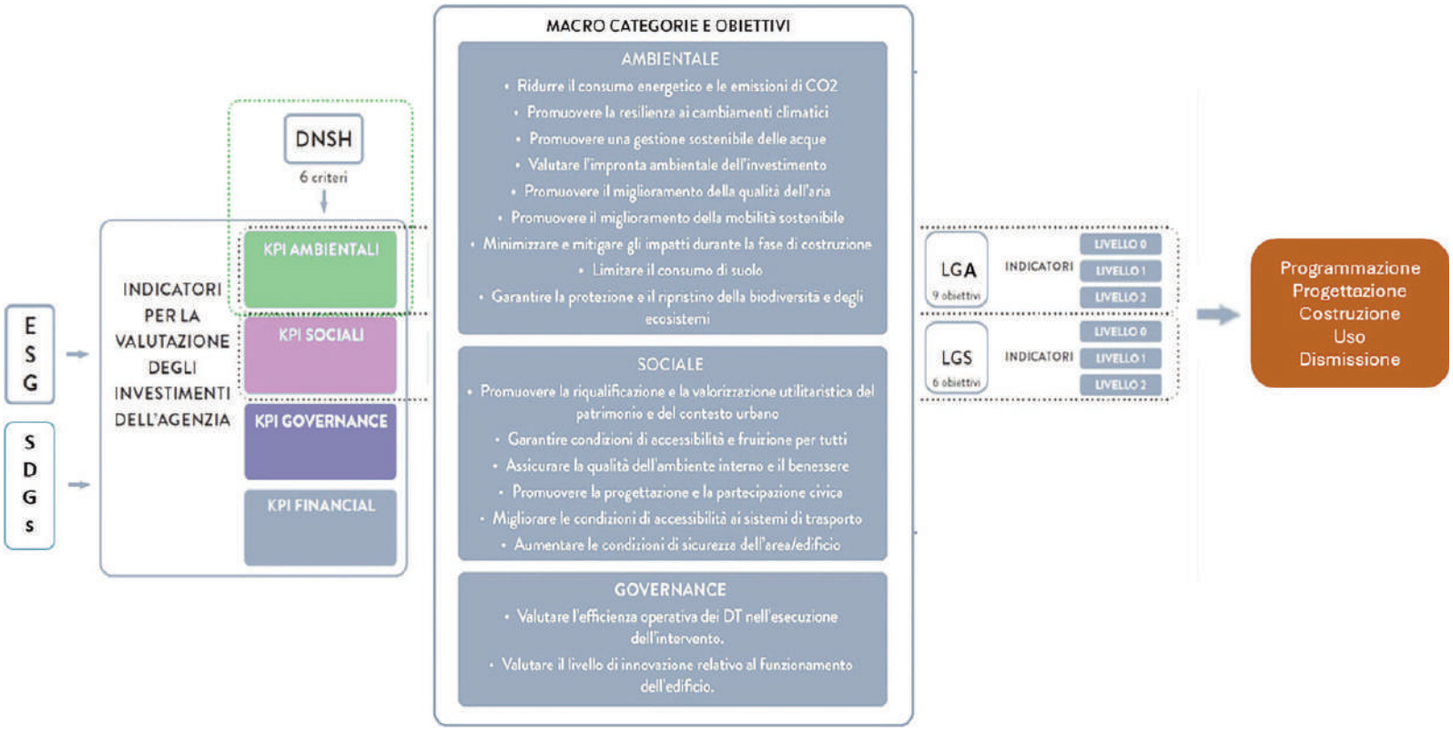


Fig. 3 | Conceptual scheme of the tool developed for the Agenzia del Demanio in the 2023 version (credits: Envi-Reg research group, 2023).

no per una natura multifunzionale, capace di generare benefici integrati sul piano ambientale, sociale e prestazionale.

Per ciascun obiettivo individuato dall'Agenzia del Demanio, le Linee guida illustrano e motivano possibili azioni progettuali, soluzioni tecniche, esempi applicativi e buone pratiche; a tali contenuti si affiancano indicatori e i relativi metodi di calcolo, necessari a misurare i livelli di prestazione attesi e conseguiti. In questo modo lo strumento consente di confrontare lo stato iniziale con diverse alternative progettuali nella fase preliminare, di comparare soluzioni differenti – anche nell'ambito di procedure concorsuali – e di monitorare gli esiti dell'intervento durante la costruzione, la gestione e l'eventuale dismissione.

La verifica delle prestazioni lungo l'intero processo consente così di garantire coerenza e continuità tra programmazione, progettazione, realizzazione e uso dell'opera: gli esiti diventano misurabili, l'efficacia degli interventi può essere valutata nel tempo e, in presenza di criticità, possono essere attivati correttivi mirati. Parallelamente il processo contribuisce alla costruzione di un quadro conoscitivo trasferibile a interventi futuri, alimentando un percorso progressivo di miglioramento continuo delle prestazioni ambientali e sociali del Patrimonio gestito dall'Agenzia del Demanio.

Dal possibile al necessario | Dopo aver ricondotto l'infrastrutturazione del territorio entro una logica transcalare, prestazionale e verificabile, emerge un ulteriore passaggio critico: distinguere ciò che è tecnicamente possibile da ciò che è realmente necessario. L'avanzamento delle conoscenze scientifiche e dei saperi tecnici consente oggi di realizzare soluzioni sempre più complesse, spesso superando limiti che in passato avrebbero condizionato in modo sostanziale l'azione progettuale. Proprio questa ampliata capacità operativa impone tuttavia una maggiore responsabilità decisionale, poiché la possibilità di costruire non coincide necessariamente con l'opportunità di farlo.

La questione non riguarda dunque soltanto il controllo degli impatti sociali e ambientali, ma anche la definizione di un criterio di selezione basato sulla reale necessità dell'intervento e sulla soluzione tecnica adottata. Non si tratta di realizzare tutto ciò che appare utile o 'desiderabile', ma di riconoscere, all'interno del campo delle utilità possibili, ciò che risponde a una condizione di necessità, evitando di compromettere uno dei principi fondativi della sostenibilità, così come definita dal Rapporto Brundtland (World Commission on Environment and Development, 1987): soddisfare i bisogni del presente senza ridurre la possibilità delle generazioni future di soddisfare i propri. Questo spostamento di prospettiva consente di riorientare lo sguardo progettuale, mettendo in discussione postulati operativi spesso assunti come inevitabili e aprendo a soluzioni meno evidenti, ma più coerenti con le condizioni ambientali, sociali e territoriali in cui l'intervento si colloca.

Da questo punto di vista diventa interessante analizzare una recente esperienza di ricerca sviluppata dall'Università di Catania con la Riserva Naturale Orientata Saline di Priolo gestita dalla LIPU[4]. Applicando un approccio transcalare che partiva da ragionamenti di grande scala che hanno coinvolto la costa siciliana nel tratto tra Priolo e la Riserva Naturale Orientata Fiume Ciane e Saline di Siracusa (Fig. 4; Alini, Foti and Musumeci, 2025) la ricerca ha identificato e sviluppato una proposta innovativa per l'infrastrutturazione della Riserva di Priolo, in particolare lo sviluppo di soluzioni sostenibili e poco impattanti per la fruizione dell'area, nonché l'impiego di infrastrutture funzionali alla mitigazione di problemi di carattere ecosistemico dell'area. Su questo presupposto è stata identificata una specie aliena infestante, responsabile di una significativa riduzione della biodiversità, che ciclicamente viene eradicata, al solo scopo di contenerne l'espansione, con la conseguente produzione di rifiuti vegetali da smaltire in discarica (Greco, Maraldi and Molari, 2023; Greco et alii, 2024). A partire da un'attività di caratterizzazione meccanica della 'Arundo donax', o canna comune, è stata valutata la possibilità di impiegare questa essenza per la realizzazione di infrastrutture leggere a supporto della fruizione del sito. La definizione delle sue caratteristiche strutturali (Molari, Coppolino and García, 2021) ha consentito di trasformare un materiale di scarto in una materia prima da costruzione (Figg. 5, 6), utilizzabile per la realizzazione di manufatti destinati sia alla fruizione (Figg. 7-12), come uno spazio per la didattica (Figg. 13-15), sia alla conservazione dell'ecosistema, come nel caso delle barriere di protezione dei cordoni dunali.

In questo modo l'intervento non si limita a rispondere a esigenze puntuali di accessibilità e uso dell'area, ma contribuisce ad affrontare criticità ambientali più ampie, quali la produzione ricorrente di rifiuti organici da smaltire e la perdita di biodiversità. Quest'ultima appare particolarmente rilevante in un ecosistema di elevato valore che, dopo essere stato profondamente compromesso nell'ultimo secolo dall'insediamento di impianti petrolchimici, oggi partecipa a un processo di progressiva ricostruzione ecologica. La riconfigurazione di paesaggi compromessi richiede infatti di superare la sola logica del recupero ambientale, assumendo il progetto come strumento per ricostruire prestazioni ecologiche, accessibilità controllata e nuove relazioni tra comunità, risorse locali e sistemi naturali (Ahmed and Capuano, 2025). La ricerca ha così aperto la possibilità di attivare nuove filiere produttive dell'economia circolare, in grado di generare

una catena di valore a partire da una risorsa naturale locale finora trattata come scarto da conferire in discarica. L'Arundo donax è stato scelto come un'opportunità per innescare una economia circolare legata all'uso innovativo di un materiale naturale capace di sequestrare elevate quantità di CO_2 dall'aria ed inquinanti dal suolo. Recuperare nuovi usi di questo materiale aiuterebbe infatti a limitarne l'espansione incontrollata, darebbe slancio a nuove forme di economia circolare, contribuirebbe con modestissimi investimenti alla bonifica di suoli, nello specifico di porzioni significative dell'area SIN di Priolo, e offrirebbe un contributo alle strategie globali di lotta al cambiamento climatico. In territori segnati da pressioni industriali e da processi di trasformazione ambientale la circolarità non riguarda soltanto il recupero di materiali ma la capacità di riconoscere nuove relazioni tra risorse locali, Patrimoni compromessi, prestazioni ambientali e strategie di rigenerazione (Baiani et alii, 2024). In questa prospettiva il caso della Riserva di Priolo consente di verificare come la necessità progettuale possa coincidere con la riduzione degli impatti e con l'attivazione di economie locali a bassa intensità materiale.

SDG 9, sinergie e compromessi | Anche se il saggio e l'analisi dei casi studio sono stati sviluppati a partire dai contenuti dell'SDG 9 i ragionamenti e i riferiementi presentati non si esauriscono entro i suoi target ma si relazionano con altri Obiettivi di Sviluppo Sostenibile, producendo non solo sinergie ma anche potenziali compromessi. Infatti i temi approfonditi sono direttamente riconducibili ugualmente agli obiettivi dell'SDG 11 (Città e comunità sostenibili), dell'SDG 13 (Lotta contro il cambiamento climatico) e dell'SDG 15 (La vita sulla terra) che si caratterizzano per contenuti fortemente interdipendenti che non possono non integrarsi nelle azioni programmatorie, pianificatorie e di intervento sull'ambiente antropico.

Parallelamente esistono significative sinergie, pur se meno dirette, e impatti positivi derivanti dal miglioramento dell'accesso ai servizi, dal miglior uso delle risorse e dalla riduzione della vulnerabilità dei territori, rispetto all'SDG 3 (Salute e benessere), all'SDG 6 (Acqua pulita e servizi igienico-sanitari), all'SDG 7 (Energia pulita e accessibile), all'SDG 8 (Lavoro dignitoso e crescita economica) e all'SDG 12 (Consumo e produzione responsabili).

All'opposto vi sono anche delle potenziali criticità rispetto al consumo delle risorse economiche e naturali che la realizzazione e la manutenzione delle infrastrutture indubbiamente richiedono e che rischiano di stridere con la volontà di salvaguardia degli ecosistemi e riduzione dell'impronta ecologica. Infatti alcune azioni rischiano di mascherare situazioni, se non di greenwashing (Freitas Netto et alii, 2020), di greenwasting (Battisti, Cuomo and Manganelli, 2025) soprattutto quando gli interventi non vengono correttamente sviluppati e gestiti rendendoli inefficaci sia in termini di risorse che economici. In tal senso incidono significativamente le differenze tra i territori anche in termini di capacità di governance ma anche l'eccessiva tendenza a monetizzare i servizi ecosistemici che vengono degradati o non prodotti.

Conclusioni | I tre esempi analizzati mostrano come l'approccio metodologico della Progettazione Tecnologica e Ambientale, fondato su transcalarità, transdisciplinarietà e visione sistemica dei problemi e delle soluzioni, possa contribuire ad aggiornare l'apparato concettuale e strumentale attraverso cui tradizionalmente si affrontano i processi di infrastrutturazione dei territori. Tale impostazione risulta coerente con i target dell'SDG 9, poiché consente di orientare l'intervento verso soluzioni innovative e multifunzionali e, se integrata con i più recenti strumenti di valutazione ex ante degli impatti progettuali, rafforza la capacità predittiva e anticipatoria del progetto su diverse scale.

Occorre inoltre precisare il perimetro di validità delle conclusioni formulate. I tre casi analizzati costituiscono un corpus intenzionale e qualitativo, selezionato per esplicitare differenti scale e condizioni operative della Progettazione Tecnologica e Ambientale: la scala territoriale-programmatoria del PTCP di Lodi, la scala procedurale e prestazionale delle Linee guida dell'Agenzia del Demanio, la sca-

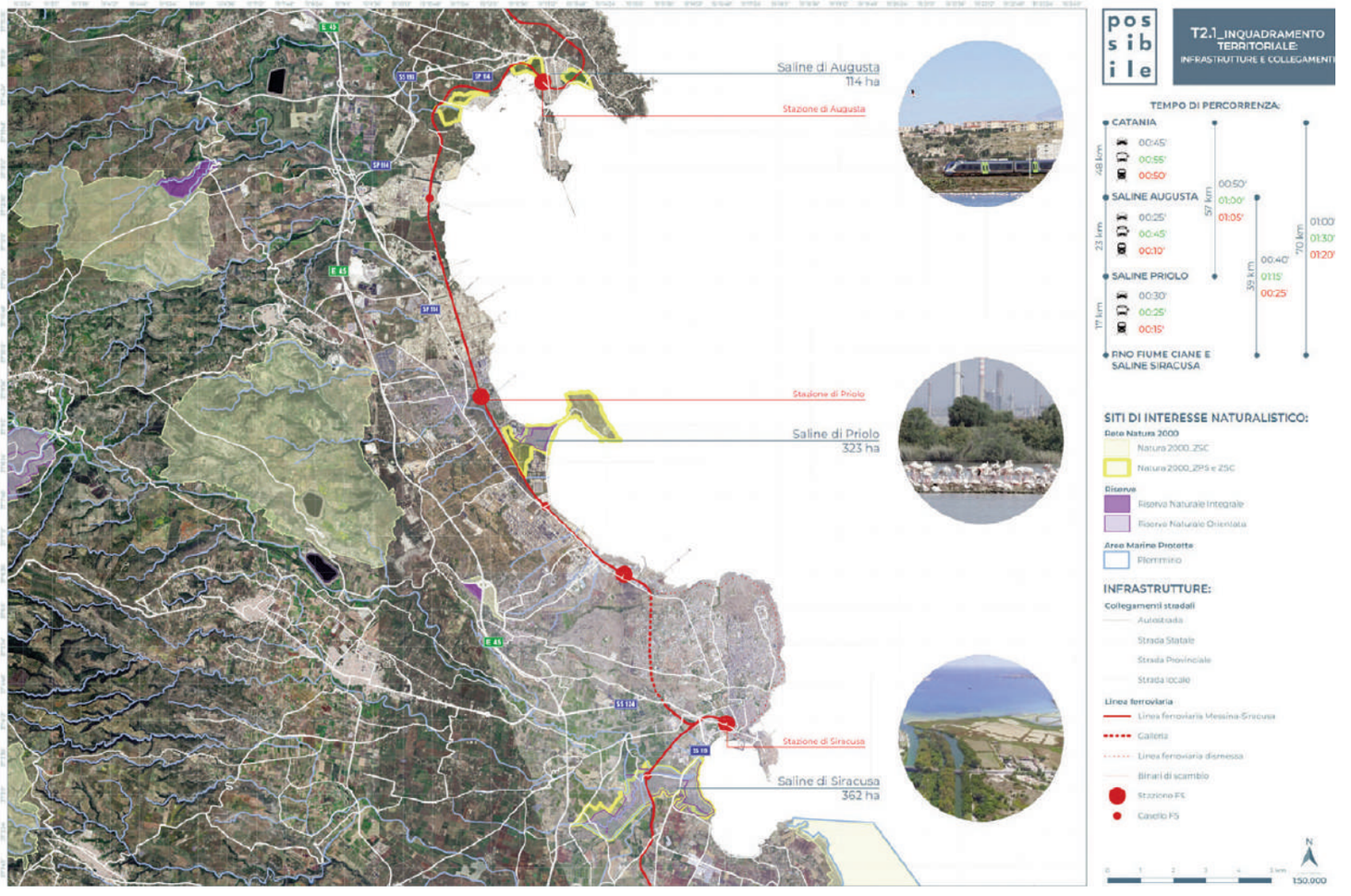


Fig. 4 | Relations between the physical infrastructure system and the Nature Reserves along the coastal stretch between Augusta and Syracuse (credits: G. Caponetti, 2024).





Figg. 5, 6 | In situ selection phase of reeds for construction (credits: the Authors, 2025).

la del manufatto leggero e reversibile nella sperimentazione della Riserva di Priolo. La loro numerosità non consente una generalizzazione statistica degli esiti, né autorizza un'estensione automatica del modello a contesti territoriali, amministrativi o normativi differenti. Il valore del confronto risiede piuttosto nella costruzione di una lettura interpretativa e metodologica capace di mettere in relazione infrastrutturazione del territorio, qualità ambientale, servizi ecosistemici, innovazione territoriale e utilità sociale.

In questa prospettiva la scelta di casi nazionali ha permesso di osservare con maggiore coerenza il rapporto tra quadro normativo, strumenti amministrativi, processi decisionali e dispositivi progettuali, pur limitando la verifica della trasferibilità internazionale del modello, soprattutto in Paesi caratterizzati da assetti di governance e sistemi regolativi sensibilmente diversi. Un ulteriore limite riguarda la recente attuazione delle esperienze considerate: gli effetti ambientali, sociali ed economici nel medio e lungo periodo risultano ancora parzialmente osservabili e richiedono monitoraggi successivi, fondati su indicatori prestazionali e confronti con ulteriori casi applicativi. Tale aspetto rappresenta una condizione decisiva per consolidare la capacità dell'approccio proposto di integrare, in modo verificabile, dimensione ambientale, qualità sociale e sostenibilità economica nei processi di infrastrutturazione del territorio.

Certamente questo modello entra in tensione con la tendenza alla specializzazione estrema che ancora caratterizza sia il mondo della ricerca sia quello della programmazione e della progettazione degli interventi. La complessità delle sfide ambientali e sociali impone invece una revisione dei modelli tradizionali e la sperimentazione di soluzioni alternative, capaci di ridurre le criticità prodotte dalle azioni antropiche dal Novecento a oggi. In questa prospettiva non è sufficiente applicare soluzioni basate sulla natura per rivestire di verde modelli infrastrutturali tradizionali ma occorre ripensare i modelli stessi a partire dai servizi realmente necessari alle comunità, individuando modalità di organizzazione e attrezzamento del territorio capaci di garantire l'erogazione di tali servizi secondo criteri coerenti con i target 9.1, 9.4 e 9.a.

In tal senso la volontà di passare 'dal possibile al necessario' significa adottare una nuova unità di misura per valutare le alternative di intervento (o di non intervento) sia allargando il controllo delle ricadute a un arco temporale più ampio, che consideri anche diversi modelli di sviluppo, sia contemplando una maggiore articolazione di criteri di valutazione con cui definire la reale necessità degli interventi rispetto al contesto territoriale e ai suoi contenuti di carattere sociale e ambientale.

The evolution of social life models, increasingly influenced by cultural and economic factors and by new technologies, has radically changed traditional urban infrastructure and the spaces in which human beings 'organise' their actions: the transformation and use of territory are increasingly configured as a field of relations, services, and other forms of collective value. As Settis (2011) argues, the space in which we live, whether urban or rural, is human-made because it is, by definition, a social space: it results from economic processes, political decisions, cultural factors, and lines of force that combine in different ways, altering the balances between public and private, religious and secular, functional and symbolic dimensions. It is therefore a social space in continuous evolution, whose transformation may depend on a design and strategic vision rather than on chance or on the deterioration produced by abandonment.

The inescapability and centrality of human action, together with the need for that action to be governed by logics of use rather than consumption and oriented towards future generations, is confirmed by the central place assigned to infrastructure within the UN 2030 Agenda (UN, 2020). Indeed, the most evident anthropic action on territories is normally expressed through infrastructuring processes, through actions required to support development and respond to the evolving demands and needs of populations. This theme, which is necessary to ensure quality of life, is explicitly addressed by three targets within SDG 9, namely:

– target 9.1, aimed at developing quality, reliable, sustainable, and resilient infrastructure, including regional and transborder infrastructure, to support economic development and human well-being, with particular attention to equitable and universal access;

– target 9.4, oriented towards upgrading infrastructure and sustainably retrofitting industrial systems through more efficient use of resources and greater adoption of clean and environmentally sound technologies and processes, according to the capacities of individual countries;

– target 9.a, intended to facilitate sustainable and resilient infrastructure in developing countries through enhanced financial, technological, and technical support, with particular attention to least developed countries, landlocked developing countries, and small island developing states.

These targets confirm, on the one hand, the undeniable need for progressive infrastructuring as an unavoidable condition for a more equitable and just world and, on the other, articulate a strong critique of traditional models that require a shift (Fanzini, Tartaglia and Riva, 2019; UNOPS, 2020) in terms of sustainability and long-term quality, as emphasised by the introduction of the term 'reliable'. However, the pursuit of the above objectives cannot be reduced to a single operational trajectory, nor entrusted to a highly specialised unitary model. The targets of SDG 9 themselves indicate a dual line of action: on the one hand, the development and implementation of new infrastructural models, as indicated by target 9.1; on the other, the upgrading of existing and, in many cases, strongly consolidated systems, as required by target 9.4. These objectives are still far from being





Figg. 7, 8 | Images of several preparation phases of the bundles composing the structural system (credit: the Authors, 2025).

fully achieved and require significant commitment at the programming, design, and implementation levels (UN, 2020).

In the light of these premises, the contribution aims to demonstrate how the infrastructuring of territory can be rethought through a trans-scalar, performance-based, and systemic approach capable of integrating environmental quality, ecosystem services, and social utility. The essay is structured into four sections: a critical reconstruction of the evolution of infrastructural models; analysis of the programming dimension through the Lodi PTCP; verification of the transition from programming to design through the Guidelines of the Agenzia del Demanio; and discussion of the criterion of necessity through the experimentation in the Priolo Reserve.

The three case studies were selected because they represent different moments and scales of the infrastructuring process and because they were developed consistently with the methodological approach and tools of Technological and Environmental Design for Architecture. They therefore make it possible to clarify how this approach can be deployed continuously across different situations, ensuring the necessary coherence between objectives and outcomes and responding fully to the contemporary challenges set out in the United Nations 2030 Agenda.

The scientific interest lies in the proposal of a transferable interpretative key, useful for orienting infrastructural choices that are not only sustainable, but also necessary, measurable, and consistent with the targets defined within the SDGs. In summary, the cases presented confirm the hypothesis that an infrastructure is sustainable not simply when it reduces impacts, but when it demonstrates necessity, multifunctionality, ecosystem coherence, and performance verifiability.

Infrastructures in evolution | Traditionally, infrastructures, now commonly framed as 'grey infrastructure', were created to meet a specific need. Their implementation followed strongly functionalist and specialist logics that rarely engaged with impacts or interferences, except when they interacted with infrastructures or systems of comparable level and importance. This model is now in decline, and its effects have been, and continue to be, addressed through the introduction of tools such as Strategic Environmental Assessment, Environmental Impact Assessment, and/or Appropriate Assessment, whose purpose is to accompany processes and decisions in order to limit, or possibly eliminate, the negative environmental effects produced by anthropic actions, or to identify compensatory measures capable of rebalancing any impacts produced.

In recent years, further tools have been introduced to manage the sustainability of a work more effectively, particularly in the case of major infrastructure, such as the Envision Protocol. This protocol makes it possible to assess the effectiveness of an investment, the effects of the work on the ecosystem, its durability and benefits for citizens' quality of life, and its capacity to attract private capital and generate economic value (Alini and Martino, 2023). The protocol is easy to apply, but it has limitations that are most effectively summarised by the concept of 'land take', understood as the negative environmental effect produced by anthropic intervention. It is, in fact, a model that still 'consumes' resources and causes the loss, in many cases irreversible, of opportunities for future generations.

The alternative proposed in recent years has focused on so-called 'green and blue infrastructure', namely complex systems composed of natural and/or artificial elements characterised by intrinsic multifunctionality and by the capacity not only to respond to strictly functional requirements, as grey infrastructures do, although not always with the same effectiveness, but also to contribute to the creation, restoration, or enhancement of so-called ecosystem services (Mussinelli et alii, 2018), understood as free benefits that are nevertheless necessary for human well-being, health, the economy, and, above all, human survival itself.

The construction and implementation of green infrastructure is an approach that, formalised around thirty years ago in the United States of America, subsequently became one of the defining elements of European policies as well, not only for mitigation and adaptation to the effects of climate change, but also as a new model for managing territories, whether of higher naturalistic value or urbanised. This model has led to the identification of existing network systems to be protected, enhanced, and/or completed. Ecological networks thus become a central element in large-scale planning, not only to guarantee the quality of natural ecosystems, but also to preserve networked systems in which the continuity of ecological relations is an indispensable condition for their effectiveness and 'survival'.

However, green infrastructuring, at least with current technologies, cannot be considered a full alternative to grey infrastructuring. At present, three visions, often considered mutually exclusive, coexist: the traditional model with greater environmental impact, accompanied by the assessment tools cited above to contain impacts; Nature-based Solutions (NbS), which propose more resilient and sustainable design approaches able to replace grey infrastructure or limit its negative effects; and infrastructuring processes primarily aimed at reconstructing ecosystems capable of providing new ecosystem services or restoring their delivery in contexts subject to anthropic pressures that had limited their effectiveness. Recent literature also shows that green infrastructures, especially in climatically fragile contexts, must be assessed not only for their physical presence or landscape value, but for their capacity to construct operational ecologies that are sustainable in terms of water, maintenance, and performance (Moscatelli and Raffa, 2023; D'Ambrosio, Rigillo and Tersigni, 2021).

With respect to the third type, there are also wholly or partly 'grey' models and approaches that

nevertheless seek to respond to climate-environmental criticalities. Examples include plants for the sequestration of carbon, or carbon dioxide, not only from industrial sources but directly from the atmosphere, before storing it underground, including through mineralisation processes (Pastero, 2023), or converting it for other industrial uses. In this sense, several facilities, including commercial ones, are already operating with the aim of paying for themselves both through the sale of carbon credits and through the production of industrial materials or new synthetic fuels.[1]

Climate, environmental, and social challenges cannot be addressed through a single solution applied indiscriminately to every context; they require a revision of consolidated practices. It is not enough to replace grey infrastructure with green infrastructure, since the necessity of the service, the ecosystem performance, and the territorial coherence must also be assessed. As will be explained below, this means favouring transdisciplinary and trans-scalar approaches capable of ensuring continuity between supranational strategic orientations, programming and planning tools, and detailed local actions.

From this perspective, nature-based solutions cannot be considered merely as green devices to be added to existing infrastructural models, but as multi-scalar design components capable of connecting environmental objectives, ecosystem performance, and 2030 Agenda strategies (Ingaramo et alii, 2023; Grabowski, McPhearson and Pickett, 2023). This implies the need to operate across several decision-making and design levels, revising programming and planning models that, especially in Italy, often remain anchored to sectoral and specialist logics. This approach is reversed in the three selected case studies, where traditional logics based on the opposition between grey and green infrastructure are overcome and replaced by an interpretative 'matrix' structured around three passages: the territorial-programming scale, the decision-making/design process scale, and the scale of the lightweight and reversible artefact.

Programming infrastructuring | The approach adopted for the construction of the recent Provincial Territorial Coordination Plan (PTCP)[2], approved by the Province of Lodi, is particularly interesting. In this case, the proposal and its contents were developed by integrating socio-economic reasoning, typical of urban planning, with socio-environmental aspects, typical of environmental design, so as to construct an interpretative framework capable of





comparing infrastructural and economic development issues with ecosystem-related elements.

The specificity of the Lodi PTCP does not lie simply in having introduced actions to improve the environmental characteristics of the territory, for example through incentives for the use of NbS or measures to counter land take. Rather, it lies in having modified the way in which the territory was read and interpreted, by seeking to compare socio-economic values and productive attractiveness with ecosystem values.

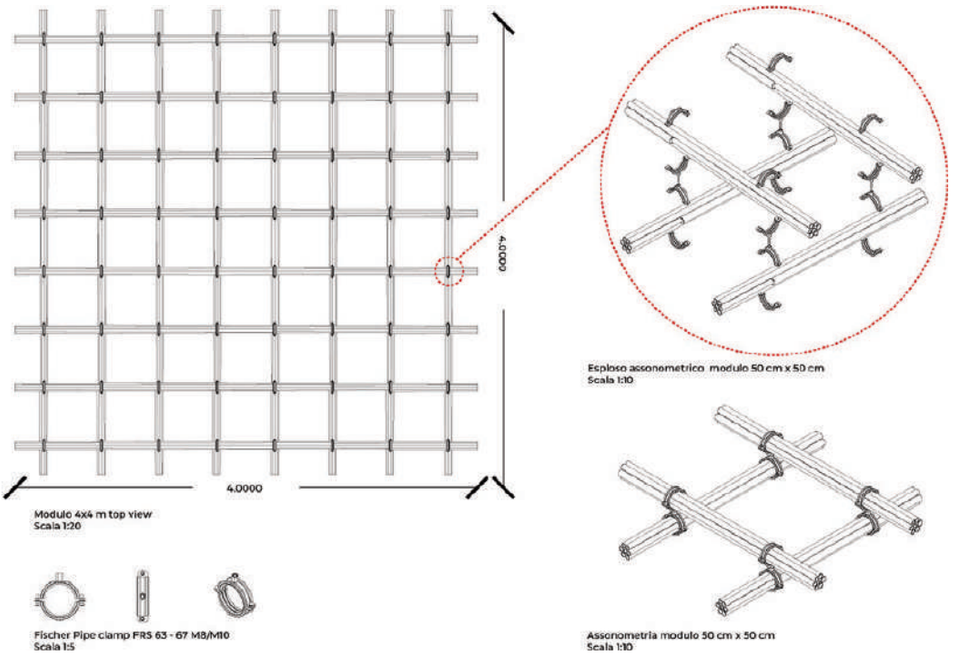
For example, analyses were developed on the water availability of provincial soils (Fig. 1), starting from land-cover data provided by the European Corine Land Cover service and subsequently processed using Simulsoil software. From this perspective, water availability is not merely an environmental indicator, but an infrastructural condition that connects soil quality, climate-adaptation capacity, ecological continuity, and the well-being of settled communities (Angelucci and Shatvoryan, 2025). Similarly, the analyses of carbon storage in provincial soils (Fig. 2) were developed according to the InVEST 'Carbon Storage and Sequestration' model. In this sense, soil cannot be regarded as a simple surface available for transformation, but as a primary design component, endowed with ecological, hydrological, and settlement-related performances that affect the overall quality of infrastructural strategies (Tesoriere, 2023). This approach enhances local 'wealth' and resources and places aspects of the traditional economy on the same level as ecosystem values, also in terms of territorial safety and adaptation to climate change.

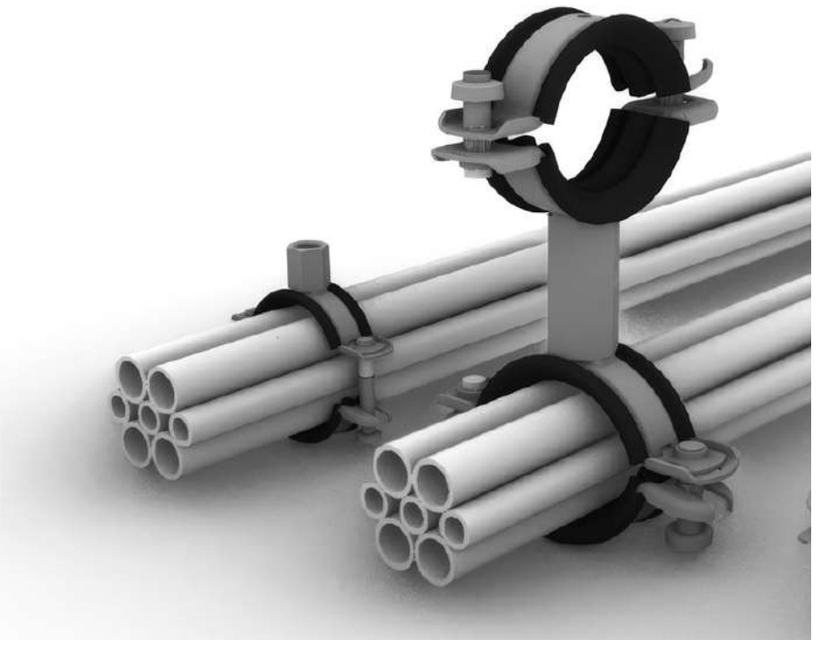
The cartographic overlay of these value components made it possible to reveal a very different territorial picture, in which there were no longer attractive areas and areas undergoing abandonment, economically interesting areas and territories of limited value. On the contrary, it became possible to observe how every territory contributed in different ways to the valorisation of the provincial area, bringing highly diversified but equally important resources, especially when analysed over a medium- and long-term time horizon. Nature and open space thus assume the role of territorial capital, not reducible to an environmental reserve or a landscape constraint, but capable of orienting ecological transition processes and redefining the hierarchies between central, marginal, and productive areas (Lecardane, 2023).

This approach made it possible to move beyond traditional competitive models between territories, introducing a collaborative vision in which

Previous page

Figg. 9, 10 | Images of deformation tests and sizing of the grid modules (credits: the Authors, 2025).





Figg. 11, 12 | Study of the connection joints of the structural elements for the construction of 'Arundo donax' artefacts (credits: P. Corbo, 2025).





Figg. 13, 14 | Images of the assembly phases of the educational room structure (credits: the Authors, 2025).

the 'successes' of certain territorial areas could and should be redistributed across the entire provincial territory, in order to enhance local specificities and vocations within a perspective of common advantage and equalisation. It was also possible to contain the demand for grey infrastructure, reduce land take, and foster a significant reversal of trend, so that local choices could contribute proactively to the construction of broader utility at provincial level without restricting the room for action of individual municipal administrations.

The idea, formalised in the final document approved by the local administrations, was to define a new model of territorial management in which economic-development processes would not only act as generative factors for green infrastructuring, but green infrastructuring itself could become a driver of local development and well-being, activating self-sustaining virtuous processes. This model did not exclude grey infrastructuring, but limited its use to situations in which it was necessary, particularly effective, and not replaceable by alternative intervention models.

Provincial-scale network actions were systematised with local interventions within a systemic and trans-scalar vision proper to environmental design (Torricelli, 2025). The aim was therefore to overcome sectoral specialisms, operational segmentations, and separations between the different scales of intervention that frequently characterise programming, planning, and design processes, while enhancing a unitary methodology that could subsequently be applied at the different moments and implementation scales of the PTCP. In this perspective, the logics used to read the territory and identify priorities at the large scale also became criteria for defining local siting and design alternatives, in line with the general strategies of the Plan.

The traditional juxtaposition between the decision-making process for territorial management and the Strategic Environmental Assessment, usually called upon to verify the sustainability of choices, was also overcome. This was achieved by integrating the Strategic Environmental Assessment indicators with those used to monitor Plan implementation, thereby making the two processes closely interdependent. This approach is consistent with the most recent approaches to integrated natural resource management, which require soil, water, vegetation, energy, and ecosystem services to be read as interconnected systems rather than as separate sectoral domains (Valente et alii, 2024). The Plan was thus configured as a genuine environmental design action, in which the process became inseparable from the product of the PTCP.

From programming to design | The pursuit of targets relating to territorial infrastructuring processes cannot, however, be limited to renewing planning and programming processes. As already noted, it must introduce, at all scales, processes and tools capable of ensuring continuity of objectives between the large scale and the individual intervention, and of ensuring that each specific action contributes to the construction of a broader territorial scenario renewed in both environmental and social qualitative terms. The design of green systems and ecosystem components must therefore be interpreted as part of a broader design transition, in which spatial devices, environmental performance, and quality of use contribute to defining new forms of sustainable infrastructuring (Pirina, Comi and d'Abramo, 2024).

In this perspective, an initial experimentation developed by the Agenzia del Demanio in collaboration with university research[3] is particularly significant. It led to the construction of a tool initially conceived to support the selection of priority interventions to be funded and subsequently developed into a device capable of accompanying the entire process, from the development of design proposals through to monitoring during use. Its relevance lies in its capacity to broaden the assessment field of individual interventions, integrating environmental and social aspects and moving beyond a logic limited to the original objectives that motivated the funding of the works.

This approach responds to the very nature of the SDGs, in which environmental and social dimensions are closely interrelated when the ultimate aim is long-term human well-being. Sustainable infrastructures generate effects that go beyond the perimeter of SDG 9, activating synergies with circular water management, urban metabolism, the quality of inhabited space, and climate adaptation (Dessì et alii, 2025; Sposito and Mittersteiner, 2025). The challenge of the research conducted with the Agenzia del Demanio was therefore to overcome the sectoral nature of the different certification tools, whether environmental, energy-related, or wellbeing-oriented, in order to construct a unitary device capable of integrating the requirements of the ESG model with the obligations deriving from the application of the DNSH criteria, connected to the use of PNRR and NextGenerationEU funds (Tartaglia et alii, 2024). Here too, the objective was to move beyond specialist approaches through a system of performance indicators, supported by calculation models and procedures for performance verification, and referred to multiple dimensions of quality.

The tool was therefore oriented towards supporting, in an integrated manner, infrastructuring interventions aimed at creating new spaces for the provision of public services. In this logic, the quality of interventions was not understood as mere compliance with regulatory standards, but as the capacity to achieve more ambitious performance objectives, calibrated in relation to the complexity and scale of the design proposals, as well as to the specific characteristics and fragilities of the sites concerned. The result is a methodological apparatus with guidance, assessment, and control functions, equipped with predictive tools and indicator systems to measure and orient the environmental and social performance of works throughout the entire decision-making, design, and management cycle.

The tool, entitled 'Guidelines for the Environmental and Social Quality of Interventions' (Agenzia del Demanio, 2023), was structured according to a logical-formal scheme designed to facilitate its application in the different phases of the process, from design to construction, and through to the management and use of the artefacts (Fig. 3). Its structure associates environmental and social ob-

jectives with examples of actions and technical solutions which, although referred to specific thematic areas, are characterised by a multifunctional nature capable of generating integrated environmental, social, and performance-related benefits.

For each objective identified by the Agenzia del Demanio, the Guidelines illustrate and justify possible design actions, technical solutions, application examples, and good practices. These contents are accompanied by indicators and related calculation methods, which are necessary to measure expected and achieved performance levels. In this way, the tool makes it possible to compare the initial state with different design alternatives in the preliminary phase, to compare different solutions, including within competition procedures, and to monitor the outcomes of the intervention during construction, management, and any eventual decommissioning.

Performance verification throughout the whole process thus makes it possible to ensure coherence and continuity between programming, design, construction, and use of the work: outcomes become measurable, the effectiveness of interventions can be assessed over time, and, when criticalities emerge, targeted corrective actions can be activated. In parallel, the process contributes to the construction of a knowledge framework transferable to future interventions, feeding a progressive path of continuous improvement in the environmental and social performance of the real-estate assets managed by the Agenzia del Demanio.

From the possible to the necessary | Having placed territorial infrastructuring within a trans-scalar, performance-based, and verifiable logic, a further critical step emerges: distinguishing what is technically possible from what is genuinely necessary. Advances in scientific knowledge and technical expertise now make it possible to implement increasingly complex solutions, often overcoming limits that in the past would have substantially conditioned design action. This expanded operational capacity, however, requires greater decision-making responsibility, because the possibility of building does not necessarily coincide with the advisability of doing so.

The issue therefore concerns not only the control of social and environmental impacts, but also the definition of a selection criterion based on the real necessity of the intervention and on the technical solution adopted. It is not a matter of implementing everything that appears useful or 'desirable', but of recognising, within the field of possible utilities, what responds to a condition of necessity, avoiding the compromise of one of the founding principles of sustainability as defined by the Brundtland Report (World Commission on Environment and Development, 1987): meeting the needs of the present without reducing the ability of future generations to meet their own. This shift in perspective makes it possible to reorient the design gaze, questioning operational assumptions often taken as inevitable and opening up less obvious solutions that are more coherent with the environmental, social, and territorial conditions in which the intervention is located.

From this point of view, it is useful to analyse a recent research experience developed by the University of Catania with the Saline di Priolo Oriented Nature Reserve, managed by LIPU[4]. Applying a trans-scalar approach that started from large-scale reasoning concerning the Sicilian coast between Priolo and the Fiume Ciane and Saline di Siracusa Oriented Nature Reserve (Fig. 4; Alini, Foti and Musumeci, 2025), the research identified and developed an innovative proposal for the infrastructuring of the Priolo Reserve. In particular, it addressed the development of sustainable and low-impact solutions for the use of the area, as well as the deployment of infrastructure designed to mitigate ecosystem-related problems within the area.

On this basis, an invasive alien species was identified, responsible for a significant reduction in biodiversity and cyclically eradicated solely to contain its expansion, with the consequent production of plant waste to be disposed of in landfill (Greco, Maraldi and Molari, 2023; Greco et alii, 2024). Starting from the mechanical characterisation of 'Arundo donax', or giant reed, the research assessed the possibility of using this species to create lightweight infrastructure supporting the use of the site. The definition of its structural characteristics (Molari, Coppolino and García, 2021) made it possible to transform a waste material into a construction raw material (Figg. 5, 6), usable for the production of artefacts intended both for visitor use (Figg. 7-12), such as an educational space (Figg. 13-15), and for ecosystem conservation, as in the case of protective barriers for dune ridges. In this way, the intervention does not merely respond to specific requirements for access to, and use of, the area, but contributes to addressing broader environmental criticalities, such as the recurring production of organic waste requiring disposal and the loss of biodiversity. The latter is particularly relevant in a high-value ecosystem which, after being deeply compromised over the last century by the establishment of petrochemical plants, is now participating in a process of progressive ecological reconstruction. The reconfiguration of compromised landscapes requires moving beyond a mere logic of environmental recovery and assuming design as a tool for reconstructing ecological performance, controlled accessibility, and new relations between communities, local resources, and natural systems (Ahmed and Capuano, 2025).

The research has therefore opened up the possibility of activating new circular-economy production chains, capable of generating a value chain



Fig. 15 | Study render of the educational room (credit: the Authors, 2025).

from a local natural resource that had previously been treated as waste to be sent to landfill. 'Arundo donax' was selected as an opportunity to trigger a circular economy linked to the innovative use of a natural material capable of sequestering significant quantities of CO_2 from the air and pollutants from the soil. Recovering new uses for this material would help limit its uncontrolled expansion, give momentum to new forms of circular economy, contribute with very modest investments to soil remediation, specifically in significant portions of the Priolo SIN area, and support global strategies to combat climate change.

In territories marked by industrial pressures and processes of environmental transformation, circularity concerns not only material recovery, but also the capacity to recognise new relations between local resources, compromised heritage, environmental performance, and regeneration strategies (Baiani et alii, 2024). From this perspective, the case of the Priolo Reserve makes it possible to verify how design necessity can coincide with impact reduction and with the activation of local economies with low material intensity.

SDG 9, synergies, and trade-offs | Although the essay and the analysis of the case studies were developed from the contents of SDG 9, the reasoning and references presented are not exhausted within its targets, but relate to other Sustainable Development Goals, producing both synergies and potential trade-offs. The themes examined are in fact also directly attributable to the objectives of SDG 11 (Sustainable Cities and Communities), SDG 13 (Climate Action), and SDG 15 (Life on Land), which are characterised by strongly interdependent contents that must necessarily be integrated into programming, planning, and intervention actions concerning the anthropic environment. At the same time, there are significant, albeit less direct, synergies and positive impacts deriving from improved access to services, better use of resources, and reduced territorial vulnerability, with respect to SDG 3 (Good Health and Well-being), SDG 6 (Clean Water and Sanitation), SDG 7 (Affordable and Clean Energy), SDG 8 (Decent Work and Economic Growth), and SDG 12 (Responsible Consumption and Production).

Conversely, there are also potential criticalities related to the consumption of economic and natural resources that the construction and maintenance of infrastructures inevitably require and that may conflict with the intention to safeguard ecosystems and reduce the ecological footprint. Indeed, some actions risk concealing situations that are, if not greenwashing (Freitas Netto et alii, 2020), then greenwasting (Battisti, Cuomo and Manganelli, 2025), especially when interventions are not properly developed and managed, making them ineffective in both resource and economic terms. In this respect, differences between territories, including in terms of governance capacity, have a significant impact, as does the excessive tendency to monetise ecosystem services that are degraded or not produced.

Conclusions | The three examples analysed show how the methodological approach of Technological and Environmental Design, based on transscalarity, transdisciplinarity, and a systemic vision of problems and solutions, can contribute to updating the conceptual and instrumental apparatus through which territorial infrastructuring processes have traditionally been addressed. This approach is consistent with the targets of SDG 9, as it makes it possible to orient interventions towards innovative and multifunctional solutions and, when integrated with the most recent tools for the ex ante assessment of design impacts, strengthens the predictive and anticipatory capacity of design across different scales.

It is also necessary to clarify the scope of validity of the conclusions formulated. The three cases analysed constitute an intentional and qualitative corpus, selected to make explicit different scales and operating conditions of Technological and Environmental Design: the territorial-programming scale of the Lodi PTCP, the procedural and performance-based scale of the Agenzia del Demanio Guidelines, and the scale of the lightweight and reversible artefact in the experimentation at the Priolo Reserve. Their number does not allow statistical generalisation of the results, nor does it authorise automatic extension of the model to different territorial, administrative, or regulatory contexts. The value of the comparison lies instead in the construction of an interpretative and methodological reading capable of relating territorial infrastructuring, environmental quality, ecosystem services, territorial innovation, and social utility.

From this perspective, the choice of national cases made it possible to observe more coherently the relationship between the regulatory framework, administrative tools, decision-making processes, and design devices, while limiting verification of the international transferability of the model, especially in countries characterised by substantially different governance arrangements and regulatory systems. A further limitation concerns the recent implementation of the experiences considered: their environmental, social, and economic effects over the medium and long term remain only partially observable and require subsequent monitoring based on performance indicators and comparisons with further application cases. This aspect is a decisive condition for consolidating the capacity of the proposed approach to integrate, in a verifiable way, the environmental dimension, social quality, and economic sustainability within territorial infrastructuring processes.

This model certainly enters into tension with the tendency towards extreme specialisation that still characterises both research and the programming and design of interventions. The complexity of environmental and social challenges instead requires a revision of traditional models and the experimentation of alternative solutions capable of reducing the criticalities produced by anthropic actions from the twentieth century to the present. From this perspective, it is not sufficient to apply nature-based solutions in order to cloak traditional infrastructural models in green; rather, the models themselves must be rethought starting from the services that communities actually need, identifying ways of organising and equipping the territory capable of guaranteeing the provision of those services according to criteria consistent with targets 9.1, 9.4, and 9.a.

In this sense, the intention to move 'from the possible to the necessary' means adopting a new unit of measure for assessing intervention, or non-intervention, alternatives by extending the control of impacts over a broader time horizon, one that also considers different development models, and by contemplating a more articulated set of assessment criteria with which to define the real necessity of interventions in relation to the territorial context and its social and environmental contents.

Acknowledgements

The contribution is the result of a shared reflection by the Authors. Nevertheless, the paragraphs 'Programming infrastructuring' and 'From programming to design' are attributable to A. Tartaglia, the paragraph 'From the possible to the necessary' to L. Alini, while the introductory paragraph, 'Infrastructures in evolution', and 'Conclusions' are to be attributed equally to both Authors.

Notes

1) These plants, while certainly representing one route for reducing the carbon dioxide present or emitted into the atmosphere, currently show an annual storage capacity of limited significance compared with what is necessary to contain or halt the rise in the Earth's temperature. Moreover, the storage capacity of these plants should be compared with the carbon footprint of the plants themselves in order to assess their real efficiency.

2) The PTCP of the Province of Lodi was approved by Provincial Council Resolution no. 6 of 13 March 2025. The study and research activities were carried out under the general and technical-scientific coordination of the Politecnico di Milano, Envi-Reg research group: E. Mussinelli and A. Tartaglia (Scientific Coordinators), G. Castaldo (settlement and infrastructure system), D. Cerati (environmental system and land take), R. Riva (landscape and cultural heritage), A. Sereni, and M. Mulinacci. The Planning Office was coordinated by M. Binda and consisted of N. Stasolla, F. Galli, A. Garzia, G. Villani (Extractive Activities Office), M. Arras, and D. Zanaboni (Roads – Cycle Routes Office). Legal and administrative aspects were followed by A. Fossati and C. Andena of Studio Legale Associato Fossati Andena Romanenghi. The detailed studies relating to the territorial geological and hydrogeological structure were developed by GEOLAMBDA Engineering S.r.l. – M. Daguati, F. Fasséra, and L. Pezzoni. The detailed studies relating to the Strategic Environmental Assessment were carried out by Landmarkstudio, G. Fontana and G. Paris, with G. L. Bisogni.

3) The tool was initially conceived as part of an Agenzia del Demanio project, funded by DG Reform of the European Commission under the Technical Support Instrument (TSI) programme, aimed at providing tailor-made technical expertise to EU countries for the design and implementation of economic and social reforms. In particular, the Agenzia del Demanio obtained funding for the development of a methodology intended to integrate the technical-economic assessment of investment initiatives for building interventions on the State real-estate assets with attention to environmental, social, and governance factors. The tool was subsequently

implemented and refined in the form of the 'Guidelines for the Environmental and Social Quality of Interventions' within a research collaboration with the ENVI-Reg Research Group of the Politecnico di Milano. The research group that worked on the Guidelines was composed as follows: for the Agenzia del Demanio, M. Babudri, S. Arcamone, S. Domini, C. Scaramella, and G. Antonino (Direzione Servizi al Patrimonio), and F. Salucci, R. Pacini, G. Capri, and D. Giallonardo (Struttura per la Progettazione); for the Politecnico di Milano, E. Mussinelli and A. Tartaglia (Scientific Coordinators), R. Bolici, M. Buffoli, G. Castaldo, D. Cerati, G. Dall'O, D. Fanzini, G. Fontana, M. Lavagna, and A. Sereni, as well as A. F. L. Baratta and A. Magarò of Università di Roma 'Tre'.

4) The research 'Use and Enhancement of the Saline di Priolo Oriented Nature Reserve' falls within the research agreement between the Department of Civil Engineering and Architecture of the University of Catania (Scientific Coordinator L. Alini) and the Saline di Priolo Oriented Nature Reserve (Scientific Coordinator F. Cilea, LIPU). The activity involved, in its different phases, researchers from four additional Italian universities (for the University of Naples Federico II, contacts S. Pone and B. Faggiano; for the Politecnico di Bari, contact G. Fallacara; for the Politecnico di Milano, contact A. Rogora; for the Politecnico di Torino, A. Manuello Agnello; for the University of Catania, A. Tartaglia).

References

Agenzia del Demanio (2023), *Linee guida per la qualità ambientale e sociale degli interventi – versione marzo 2023*, documento interno.

Ahmed, S. R. and Capuano, A. (2025), "Infrastrutture blu per la rigenerazione ecologica – Il recupero di siti estrattivi ad Amburgo e Roma | Blue infrastructures for ecological regeneration – The recovery of mining sites in Hamburg and Rome", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 18, pp. 84-97. [Online] Available at: doi.org/10.69143/2464-9309/1832025 [Accessed 29 March 2026].

Alini, L, Foti, E. and Musumeci, R. E. (2025), "Waterfront Siracusa – Infrastrutture verdi e restauro costiero | Green infrastructure and coastal restoration – The Siracusa waterfront", in Losasso, M. and Romano, R. (ed.), *Progettazione Ambientale, sfide globali, scenari di ricerca – Contributi alla ricerca del cluster Progettazione Ambientale della Società Italiana della Tecnologia dell'Architettura | Environmental Design, global challenges, research scenarios – Contributions to research of the Environmental Design Cluster of the Italian Society of Architectural Technology*, Maggioli Editore, Santarcangelo di Romagna, pp. 122-127. [Online] Available at: doi.org/10.30448/UNI.916.72445 [Accessed 29 March 2026].

Alini, L. and Martino, A. (2023), "Progettare la sostenibilità – Metodi e strategie di valutazione ambientale | Designing sustainability – Environmental assessment methods and strategies", in *Techne | Journal of Technology for Architecture and Environment*, vol. 26, pp. 267-275. [Online] Available at: doi.org/10.36253/techne-15289 [Accessed 29 March 2026].

Angelucci, F. and Shatvoryan, A. (2025), "Riconnettere le dimensioni di acqua, città e comunità – Una sperimentazione a Yerevan (Armenia) | Reconnecting the dimensions of water, city, and community – An experiment in Yerevan (Armenia)", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 18, pp. 162-177. [Online] Available at: doi.org/10.69143/2464-9309/1882025 [Accessed 29 March 2026].

Baiani, S., Altamura, P., Turchetti, G. and Romano, G. (2024), "Transizione energetica e circolare del patrimonio industriale – Il caso dell'ex SNIA a Roma | Energy and circular transition of the industrial heritage – The Ex SNIA case in Rome", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 15, pp. 190-203. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/15152024 [Accessed 29 March 2026].

Battisti, L., Cuomo, F. and Manganelli, A. (2025), "Collaborative governance arrangements – What makes nature-based solutions endure?" in *Territory, Politics, Governance*, vol. 13, issue 10, pp. 1421-1441. [Online] Available at: doi.org/10.1080/21622671.2024.2355317 [Accessed 29 March 2026].

D'Ambrosio, V., Rigillo, M. and Tersigni, E. (eds) (2021), *Transizioni – Conoscenza e progetto climate proof*, CLEAN, Napoli.

Dessì, V., Clementi, M., Labrozzi, E., Oppimitti, F., D'Ostuni, M., Soh, C. B., Chien, S. C. and Ang, B. T. W. (2025), "Agricoltura urbana e architettura – L'acqua per ottimizzare la sinergia edificio-vegetazione | Urban agriculture and architecture – Water for optimising the building-vegetation synergies", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 18, pp. 224-237. [Online] Available at: doi.org/10.69143/2464-9309/18122025 [Accessed 29 March 2026].

Fanzini, D., Tartaglia, A. and Riva, R. (eds) (2019), *Projects challenges – Sustainable development and urban resilience*, Maggioli Editore, Santarcangelo di Romagna. [Online] Available at: theplan.it/eng/politecnica-university-press/project-challenges-sustainable-development-and-urban-resilience [Accessed 29 March 2026].

Freitas Netto, S. V., Sobral, M. F. F., Ribeiro, A. R. B. and da Luz Soares, G. R. (2020), "Concepts and forms of greenwashing: a systematic review", in *Environmental Sciences Europe*, vol. 32, issue 19, pp. 1-12. [Online] Available at: doi.org/10.1186/s12302-020-0300-3 [Accessed 29 March 2026].

Grabowski, Z. J., McPhearson, T. and Pickett, S. T. A. (2023), "Transforming US urban green infrastructure planning to address equity", in *Landscape and Urban Planning*, volume 229, article 104591, pp. 1-12. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.landurbplan.2022.104591 [Accessed 29 March 2026].

Greco, S., Maraldi, M. and Molari, L. (2023) "Grading bamboo through four-point bending tests – A report on six species of Italian bamboo", in *Construction and Building Materials*, vol. 404, article 133168, pp. 1-10. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133168 [Accessed 29 March 2026].

Greco, S., Molari, L., Valdrè, G. and Garcia, J. J. (2024), "Multilevel analysis of six species of Phyllostachys bamboo and Arundo donax – Preliminary survey on Italian grown stands", in *Wood Science and Technology*, vol. 58, pp. 1025-1049. [Online] Available at: doi.org/10.1007/s00226-024-01547-0 [Accessed 29 March 2026].

Ingaramo, R., Negrello, M., Khachatourian Saradehi, l. and Khachatourian Saradhi, A. (2023), "Il progetto transcalare delle nature-based solutions per l'Agenda 2030 – Innovazioni e interconnessioni | Transcalar project of nature-based solutions for the 2030 Agenda – Innovations and interconnections", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 13, pp. 97-108. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/1382023 [Accessed 29 March 2026].

Lecardane, R. (2023), "Natura Capitale – Transizione ecologica e fenomeni di trasformazione dello spazio aperto | Nature Capital – An ecological transition and open space transformation phenomena", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 13, pp. 119-130. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/13102023 [Accessed 29 March 2026].

Molari, L., Coppolino, F. S. and García, J. J. (2021), "Arundo donax – A widespread plant with great potential as sustainable structural material", in *Construction and Building Materials*, vol. 268, article 121143, pp. 1-14. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121143 [Accessed 29 March 2026].

Moscatelli, M. and Raffa, A. (2023), "Infrastrutture verdi in contesti aridi urbani – Ecologie in transizione oltre il Green Riyadh | Green infrastructure in arid urban contexts – Transitioning ecologies beyond Green Riyadh", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 13, pp. 75-86. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/1362023 [Accessed 29 March 2026].

Mussinelli, E., Tartaglia, A., Bisogni, L. and Malcevschi, S. (2018), "Il ruolo delle Nature-Based Solutions nel progetto architettonico e urbano | The role of Nature-Based Solutions in architectural and urban design", in *Techne | Journal of Technology for Architecture and Environment*, vol. 15, pp. 116-123. [Online] Available at: doi.org/10.13128/Techne-22112 [Accessed 29 March 2026].

Pastero, L. (2023), "Mineralizzazione della CO_2 – Processi naturali ed applicazioni all'industria e all'ambiente", in Oberti, R. (ed.), *Scienze e materiali mineralogici per uno sviluppo sostenibile*, Accademia delle Scienze di Torino, Torino, pp. 159-177. [Online] Available at: accademiadellescienze.it/media/cafcc55c-7ecd-45fb-a0f5-2229daff0499 [Accessed 29 March 2026].

Pirina, C., Comi, G. and d'Abramo, V. (2024), "Per una transizione progettuale – Composizione e progetto del verde per la città contemporanea | For a design transition – Green composition and design for the contemporary city", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 15, pp. 124-137. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/1592024 [Accessed 29 March 2026].

Settis, S. (2011), *Paesaggio Costituzione cemento – La battaglia per l'ambiente contro il degrado civile*, Einaudi, Torino.

Sposito, C. and Mittersteiner, G. (2025), "Riciclo idrico e raffrescamento urbano – Un nuovo paradigma metabolico Acqua / Energia / Cibo per le città temperate | Water recycling and urban cooling – A new Water / Energy / Food metabolic paradigm for temperate cities", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 18, pp. 22-71. [Online] Available at: doi.org/10.69143/2464-9309/1812025 [Accessed 29 March 2026].

Tartaglia, A., Babudri, M., Salucci, F., Pacini, R. and Sereni, A. (2024), "Strumenti integrati per la promozione e il controllo della qualità del progetto | Integrated tools for quality promotion and project control", in *Techne | Journal of Technology for Architecture and Environment*, vol. 27, pp. 167-176. [Online] Available at: doi.org/10.36253/techne-15129 [Accessed 29 March 2026].

Tesoriere, Z. (2023), "Architettura, custode della natura – Il progetto di suolo nella trasformazione delle autostrade urbane, 1962-2018 | Architecture, the guardian of nature – The project of the ground within the transformation of urban highways, 1962-2018", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 13, pp. 87-96. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/1372023 [Accessed 29 March 2026].

Torricelli, M. C. (2025), *Introduzione alla progettazione tecnologica ambientale dell'architettura*, Laterza, Roma.

UN – United Nations (2020), *The Sustainable Development Goals Report 2020*, United Nations, New York. [Online] Available at: unstats.un.org/sdgs/report/2020/The-Sustainable-Development-Goals-Report-2020.pdf [Accessed 29 March 2026].

UNOPS (2020), *Infrastructure for Peacebuilding – The role of infrastructure in tackling the underlying drivers of fragility*. [Online] Available at: content.unops.org/publications/Infrastructure_Peacebuilding_EN_Web.pdf [Accessed 29 March 2026].

Valente, R., Mozingo, L. A., Bosco, R. and Giacobbe, S. (2024), "Gestione integrata delle risorse naturali in contesti urbani sostenibili | Integrated natural resource management in sustainable urban context", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 15, pp. 180-189. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/15142024 [Accessed 29 March 2026].

World Commission on Environment and Development (1987), *Report of the World Commission on Environment and Development – Our common future*, Oxford University Press, Oxford. [Online] Available at: digitallibrary.un.org/record/139811?v=pdf [Accessed 29 March 2026].

AGATHÓN – International Journal of Architecture, Art and Design | n. 19 | 2026 | pp. 50-67
ISSN print: 2464-9309 – ISSN online: 2532-683X | doi.org/10.69143/2464-9309/1932026

Article Info

Received 10 March 2026
Revised 14 April 2026
Accepted 16 April 2026
Published 30 June 2026

SCUOLE COME INFRASTRUTTURE URBANE
Pianificazione, redistribuzione e rinnovo dell'infrastruttura scolastica a Tirana

SCHOOLS AS URBAN INFRASTRUCTURE
Planning, redistribution, and renewal of school infrastructure in Tirana

Frida Pashako, Ditjon Baboçi

Abstract

Il contributo considera le scuole come infrastrutture civiche in grado di incidere sulla forma urbana, sulla distribuzione delle opportunità e sulla qualità dello spazio pubblico. Assumendo Tirana come campo di osservazione, il saggio rilegge il rinnovamento e la redistribuzione della rete scolastica nel decennio 2015-2025 non come semplice programma edilizio, bensì come dispositivo di riequilibrio territoriale in una città metropolitana segnata da una crescita accelerata e da disuguaglianze socio-spaziali. Attraverso un inquadramento teorico, una lettura critica degli strumenti di Piano, l'interpretazione di tre casi studio emblematici e l'uso della cartografia dell'accessibilità come strumento conoscitivo e progettuale, il contributo propone una chiave di lettura che sposta l'attenzione dal singolo edificio alla rete scolastica come infrastruttura della città pubblica. In questa prospettiva il valore della scuola trascende la funzione educativa e riguarda la costruzione di prossimità, il welfare urbano e la giustizia spaziale.

The paper interprets schools as civic infrastructures capable of influencing urban form, the distribution of opportunities, and the quality of public space. Taking Tirana as a field of observation, the essay re-examines the renewal and redistribution of the school network in the decade 2015-2025 not as a mere building programme, but rather as a mechanism of territorial rebalancing in a metropolitan city marked by accelerated growth and socio-spatial inequalities. Through a theoretical framework, a critical reading of planning instruments, the interpretation of three emblematic case studies, and the use of accessibility mapping as both an analytical and design tool, the paper proposes an interpretative lens that shifts attention from the individual building to the school network as an infrastructure of the public city. In this perspective, the value of the school exceeds its educational function and concerns the construction of proximity, urban welfare, and spatial justice.

Keywords

rete scolastica, infrastruttura civica, prossimità urbana, giustizia spaziale, Tirana

school network, civic infrastructure, urban proximity, spatial justice, Tirana

Frida Pashako, Architect and PhD, is a Professor of Architecture and Vice-Dean at the Metropolitan University of Tirana (Albania). She has completed several 'executive' Masters at the London School of Economics and has previously served as Deputy Mayor and Director-General of the Municipality of Tirana, where she was involved in urban planning and public infrastructure projects. Her research focuses on urban transformation and governance. E-mail: f.pashako@gmail.com

Ditjon Baboçi, Architect and Urban Planner, is the Founder of Layer (Albania), a platform for spatial data and artificial intelligence. He has served as the General Director of Urban Planning and Development for the Municipality of Tirana and as Director of Atelier Albania, contributing to international strategic planning projects, including collaborations with the World Bank Group. E-mail: joni@getlayer.xyz



Nel dibattito contemporaneo sulla pianificazione urbana le scuole non possono più essere lette come meri contenitori della funzione educativa. La loro localizzazione, la loro accessibilità e il loro rapporto con gli spazi aperti incidono sulla vita quotidiana, organizzano i flussi, conferiscono centralità e dimostrano come la città distribuisce opportunità, servizi e prossimità. In questa prospettiva la scuola va intesa come infrastruttura civica: un dispositivo che collega edificio, quartiere, mobilità, spazio pubblico e forme dell'abitare collettivo. Questa interpretazione trova un primo fondamento nella riflessione di Lefebvre (1991), che considera lo spazio un prodotto sociale, e nella lettura di Rossi (1982), che riconduce la città alla lunga durata delle sue permanenze civili e istituzionali. Assunta entro questo quadro la scuola non esaurisce il proprio significato nella risposta a un fabbisogno settoriale, ma partecipa alla costruzione materiale e simbolica dell'urbano, sedimentando riconoscibilità, continuità e memoria collettiva.

La medesima linea interpretativa si rafforza se si considerano la vitalità dello spazio pubblico e la dimensione minuta della vita di quartiere. Jacobs (1961) mostra come i ritmi ordinari della città producano sicurezza e intensità d'uso attraverso la presenza diffusa di attività e persone; Gehl (2011) insiste sulla necessità di progettare contesti a misura delle pratiche quotidiane e delle interazioni sociali. Gli ingressi delle scuole, i percorsi di accesso, i marciapiedi e gli spazi di attesa funzionano esattamente in questa soglia intermedia in cui il servizio educativo incontra la città e ne alimenta l'uso ordinario. Questi spazi possono essere letti anche come dispositivi osservabili della vita pubblica quotidiana, in linea con l'approccio metodologico proposto da Gehl e Svarre (2013), che invitano a studiare sistematicamente le interazioni tra lo spazio costruito e le pratiche d'uso. È da rilevare tuttavia, secondo Cellucci, Revellini e Tatano (2025), che la progettazione dello spazio pubblico è stata tradizionalmente centrata sull'esperienza di un 'utente standard' (uomo e sano), una scelta metodologica che ha sistematicamente trascurato le esigenze specifiche di donne, anziani e persone con disabilità.

In questo contesto la scuola può anche essere interpretata come lo strumento per superare questa visione parziale, adottando un approccio sistemico e intersezionale capace di comprendere le diverse modalità di abitare la città.

La questione assume ulteriore rilievo se considerata dal punto di vista della prossimità. La letteratura sulla walkability evidenzia che la qualità del quartiere dipende dalla relazione tra densità, mix funzionale, connettività e accessibilità ai servizi quotidiani (Talen and Koschinsky, 2013). A tal proposito Talen (2019) insiste sulla necessità di organizzare le unità di vicinato in modo che i servizi essenziali siano raggiungibili a piedi; in questa prospettiva la scuola diventa uno degli indicatori più eloquenti di equità insediativa. La stessa traiettoria è sviluppata dai modelli di pianificazione basati sulla prossimità, come la 'città dei 15 minuti' proposta da Moreno, che consente di leggere la rete scolastica come presidio decisivo entro sistemi urbani policentrici (Moreno et alii, 2021). A ciò si aggiunge l'apporto di Karsten e Van Vliet (2006), che mettono al centro della qualità sociale e spaziale dei quartieri la mobilità autonoma dei bambini. Infine è interessante soffermarsi su ricerche che assumono esplicitamente le scuole come hub territoriali multifunzionali: in questa direzione Valente et alii (2024) mostrano come gli istituti scolastici possano essere reinterpretati come fulcri di 'comunità urbane sostenibili'. Considerate nel loro insieme queste chiavi di lettura permettono di interpretare le scuole come infrastrutture pubbliche capaci di incidere simultaneamente sulla qualità dell'apprendimento e sulla qualità urbana. In questa prospettiva l'infrastruttura non è soltanto un supporto tecnico, ma una forma di organizzazione della vita sociale e delle pratiche quotidiane che si configura come 'lively infrastructure' (Amin, 2014). Tale impostazione è coerente con il quadro degli Obiettivi di Sviluppo Sostenibile (SDG) delle Nazioni Unite (UN, 2015), soprattutto rispetto ai temi dell'istruzione, delle infrastrutture, della riduzione delle disuguaglianze e delle città sostenibili, ma il suo interesse per il progetto architettonico e urbano va oltre la mera corrispondenza con gli obiettivi internazionali: essa obbliga a interrogare il legame tra la forma della città, la distribuzione dei servizi e la giustizia spaziale.

Entro questo quadro il caso di Tirana (Albania) assume un rilievo specifico. La capitale albanese presenta oggi condizioni cruciali per il progetto contemporaneo: crescita metropolitana rapida, espansione informale, pressione demografica, ridistribuzione incompleta dei servizi e ridefinizione delle politiche urbane nel passaggio da una città post-socialista a un sistema metropolitano complesso[1] (Secchi, 2013). Il presente saggio assume questa condizione come campo di verifica per una tesi precisa: quando la rete scolastica viene pensata insieme ai sistemi di mobilità, agli spazi aperti e alle pratiche di quartiere, essa può operare come infrastruttura urbana redistributiva e come leva progettuale per una città più accessibile e meno diseguale.

La metodologia adottata è di natura critico-interpretativa ma resta rigorosa perché il saggio intreccia quattro operazioni: un inquadramento teorico del rapporto tra scuola e forma urbana; una lettura degli strumenti di pianificazione e dei meccanismi attuativi che hanno sostenuto il rinnovamento scolastico; la discussione di tre casi studio selezionati perché rappresentano tre diversi regimi di intervento – partenariato pubblico-privato, ricostruzione finanziata dalla cooperazione internazionale e investimento comunale diretto; infine una lettura cartografica dell'accessibilità e dei bacini d'utenza assunta non come supporto illustrativo, ma come dispositivo interpretativo per il progetto.

L'originalità del contributo risiede soprattutto nello spostamento dello sguardo dal singolo edificio alla rete scolastica, quale infrastruttura della città pubblica; tale passaggio trova un utile riscontro comparativo nello studio di Valente et alii (2024), che assume la scuola superiore come hub civico-ambientale e supporto operativo per le Pubbliche Amministrazioni (PA), sviluppando una metodologia che integra simulazioni, indicatori e valutazioni di impatto territoriale. Invece di leggere le scuole soltanto come manufatti da adeguare o come episodi architettonici isolati il saggio le assume come nodi attraverso cui misurare la coerenza tra il Piano, la distribuzione territoriale, la qualità dello spazio aperto e la capacità di attivare l'uso collettivo. In tal modo il contributo può interessare la comunità scientifica non solo perché discute un caso attuale, ma anche perché propone una chiave trasferibile per riportare l'infrastruttura scolastica al centro del progetto architettonico e urbano. La struttura del testo riflette questa impostazione: dopo l'inquadramento introduttivo il saggio analizza la trasformazione di Tirana nel quadro della sua recente agenda urbana, discute gli strumenti di pianificazione e i meccanismi finanziari che hanno reso possibile il rinnovamento della rete scolastica, interpreta criticamente tre casi emblematici, sviluppa il nucleo metodologico e originale del contributo attraverso la lettura cartografica della rete, affronta barriere, trasferibilità e limiti e infine, con due paragrafi dedicati alle sinergie e ai compromessi con i 17 SDG e alle conclusioni, riporta riflessioni orientate ad aprire il dibattito sul tema trattato.

Teoria del cambiamento a Tirana e visione politica: rigenerazione urbana e agenda 'a misura di bambino' | La trasformazione dell'infrastruttura scolastica nella capitale albanese deve essere letta alla luce dei processi di crescita metropolitana, dello sviluppo informale e della redistribuzione incompleta delle infrastrutture che hanno segnato la città dopo il 1991 (Aliaj and Haxhiu, 2025). Nel giro di pochi decenni Tirana è passata da centro amministrativo relativamente compatto a principale polo urbano del Paese, concentrando popolazione, attività economiche e funzioni istituzionali (World Bank Group, 2007; INSTAT, 2024)[2]. La crescita si è prodotta spesso attraverso forme di urbanizzazione più rapide della capacità di governo del territorio: margini costruiti in modo informale o semi-formale, connessioni disordinate tra città consolidata e nuovi quartieri, occupazione progressiva degli spazi pubblici e compressione delle dotazioni collettive (Bateman, 2019; Fig. 1). In tale quadro anche l'infrastruttura scolastica ha subito pressioni evidenti, poiché cortili e aree aperte sono stati ridotti, occupati o frammentati, con effetti diretti sulla qualità degli spazi educativi e sulla loro funzione civica (Figg. 2, 3).

Il problema, dal punto di vista del progetto, è che la geografia della residenza e quella dei servizi non si sono sviluppate in modo sincrono: in numerosi quartieri di formazione recente la dotazione di scuole, spazi pubblici e infrastrutture della mobilità è arrivata tardi o in misura insufficiente, rendendo visibili forme persistenti di disuguaglianza territoriale riconducibili a processi di frammentazione infrastrutturale (Graham and Marvin, 2001). La questione scolastica va quindi intesa non come segmento separato della politica educativa, ma come campo in cui si misurano la capacità redistributiva della pianificazione e la consistenza materiale della città pubblica. Il decennio 2015-2025 segna, sotto questo profilo, un cambio d'impostazione. Il Piano Regolatore Generale del Comune di Tirana (Boeri, 2016), sviluppato in collaborazione con Stefano Boeri Architetti e un team internazionale di esperti[3], rimette al centro lo spazio pubblico, l'accessibilità e le infrastrutture sociali, cercando di sostituire una crescita prevalentemente reattiva con una strategia di maggiore riequilibrio urbano. In questo passaggio la filosofia della città 'a misura di bambino' non è soltanto comunicazione politica, ma richiama, almeno nelle intenzioni, il legame tra qualità urbana, sicurezza, mobilità di prossimità e diritto dei più giovani alla città seguendo i principi di Urban 95 Agenda[4] (Beck and Kaune, 2025) e in coerenza con le riflessioni di Gehl (2010) e di Karsten e Van Vliet (2006).

La riqualificazione della Skanderbeg Square[5] è spesso assunta come simbolo di questa nuova agenda urbana (Fig. 4); la sua rilevanza tuttavia, per

il tema qui affrontato, non sta soltanto nell'immagine pubblica che produce, ma nel segnale politico che trasmette: restituire centralità allo spazio pedonale, agli usi collettivi e alle attrezzature culturali significa predisporre un quadro favorevole anche alla riconsiderazione delle scuole come infrastrutture urbane diffuse; in questo senso la documentazione comunale relativa alla riqualificazione del centro civico costituisce un riferimento utile (Municipality of Tirana, 2017). Nella stessa direzione si collocano, da un lato la rifunzionalizzazione della Piramide di Tirana[6] (Fig. 5) nel TUMO Center for Creative Technologies, che ha trasformato un edificio realizzato nel 1988 come museo dedicato a Enver Hoxha in un'infrastruttura educativa orientata alla formazione giovanile e all'innovazione digitale[6], dall'altro il progressivo ampliamento della rete ciclabile e dell'accessibilità al trasporto pubblico, che mostra come la mobilità quotidiana sia stata assunta come componente strutturale della vita urbana (Figg. 6, 7).

Su questo sfondo acquistano significato anche gli interventi sulle strade che circondano le attrezzature scolastiche (Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit, 2024): iniziative di moderazione del traffico, chiusure temporanee e riorganizzazione delle soglie di accesso possono essere lette alla luce dell'urbanismo tattico descritto da Lydon and Garcia (2015), ma diventano davvero efficaci solo quando non restano azioni episodiche. Se il loro valore sta nel rendere più sicuro e leggibile il rapporto tra scuola, strada e quartiere, la loro criticità emerge quando tali dispositivi non sono sostenuti da una politica stabile di redistribuzione delle attrezzature e di rafforzamento dello spazio pubblico.

Per questa ragione Tirana interessa non tanto come caso celebrativo di una 'città per bambini' (Kuris, 2019), quanto come laboratorio critico in cui il progetto urbano misura la propria efficacia quando incontra la domanda ordinaria di servizi e la necessità di ricucire una città cresciuta in modo asimmetrico. Se i grandi interventi urbani definiscono l'immaginario della trasformazione, è la rete scolastica a verificare se quel mutamento produce davvero prossimità, accessibilità e redistribuzione.

Strumenti di pianificazione e valutazione tecnica dei fabbisogni dell'infrastruttura scolastica | Il rinnovamento della rete scolastica di Tirana non è stato avviato come somma di interventi episodici, bensì come risposta a un quadro tecnico che evidenziava la distanza tra la domanda insediativa e la capacità dell'offerta pubblica. Lo studio di fattibilità elaborato dal Comune ha adottato standard educativi e indicatori spaziali per misurare la capienza, il sovraffollamento, la distribuzione territoriale e l'accessibilità delle scuole esistenti in riferimento alle norme e agli standard per la progettazione delle scuole nel sistema pre-universitario (Ministry of Education and Sports, 2015). La rilevanza di questa fase analitica non consiste soltanto nell'aver quantificato un deficit; consiste soprattutto nell'aver trasformato la questione scolastica da materia amministrativa del settore educativo a questione urbana, dunque in un problema di Piano, di localizzazione e di equità territoriale.

Il Progetto Strategico 07 del Piano Regolatore Generale, dedicato a una rete estesa di scuole aperte, inserisce esplicitamente l'infrastruttura educativa nella costruzione della città pubblica. Le scuole vengono così interpretate come nodi civici multifunzionali, capaci di sostenere attività di comunità e di concorrere alla formazione di centralità di quartiere integrate con spazi pubblici e sistemi locali di mobilità. Allo stesso tempo i Piani particolareggiati, quali i Partial Development Plans (PDV), sono chiamati a garantire che la previsione delle nuove strutture non resti astratta, ma si traduca nella tutela dei suoli e nella loro integrazione con la crescita residenziale. Sia lo studio di fattibilità sia il quadro strategico del Piano Regolatore Generale hanno fornito la base analitica e spaziale per l'attuazione del programma di Partenariato Pubblico-Privato (PPP) per la costruzione di scuole e, successivamente, sono stati utilizzati come quadri di riferimento nei processi di pianificazione attivati dopo il terremoto del 2019, che ha richiesto la ricostruzione e l'adeguamento di diverse attrezzature scolastiche nell'area metropolitana (Fig. 8).

Dal punto di vista disciplinare questo passaggio è rilevante perché rovescia una gerarchia consolidata: non è più la scuola a dover adattarsi semplicemente alla crescita urbana, ma è la crescita urbana a dover essere giudicata anche in base alla propria capacità di incorporare infrastrutture per l'educazione, lo spazio pubblico e l'accessibilità. La forza di tale impianto sta nel tentativo di saldare visione strategica e regole attuative; la sua criticità emerge invece quando disponibilità dei suoli, tempi per l'esproprio delle aree, pressione immobiliare e frammentazione amministrativa rendono difficile trasformare la previsione in progetto realizzato.

Meccanismi finanziari per lo sviluppo dell'infrastruttura scolastica a Tirana: investimento pubblico, partenariati e sostegno internazionale | La realizzazione del programma scolastico a Tirana è stata resa possibile da un assetto finanziario complesso, in cui si sono intrecciati, PPP, cooperazione internazionale e investimento comunale. Questa diversificazione delle fonti di finanziamento è stata una scelta strategica che ha consentito al Comune di accelerare la realizzazione dell'infrastruttura, rispondendo al tempo stesso alla crescente domanda generata dalla crescita demografica e dalle disuguaglianze spaziali.

Le risorse comunali hanno sostenuto la quota maggiore degli interventi, finanziando la nuova costruzione o la ricostruzione di 22 scuole, mentre 9 scuole sono state realizzate tramite schemi di PPP;



Fig. 1 | Tirana (Albania), rapid urban growth: the metropolitan population reached approximately 1,000,000 inhabitants in about 25 years (credit: D. Baboçi, 2014).

ulteriori interventi sono stati resi possibili dalla cooperazione internazionale e da donazioni mirate, tra cui 4 scuole finanziate mediante programmi attuati con l'UNDP e 3 scuole sostenute dal Qatar Fund, oltre a iniziative di minore entità promosse da fondazioni internazionali e missioni diplomatiche. Questi contributi sono stati mobilitati soprattutto dopo il terremoto del 2019, quando la Donors' Conference for Albania, svoltasi a Bruxelles nel febbraio 2020, ha riunito Governi, Organizzazioni internazionali e Agenzie di sviluppo per sostenere la ricostruzione delle infrastrutture danneggiate.[7]

Nel modello adottato dal Comune il partenariato non è stato impiegato come mera formula contrattuale ma come dispositivo di anticipazione dell'investimento pubblico in presenza di un fabbisogno elevato e di una capacità ordinaria di spesa insufficiente. Si trattava di uno schema integrato in cui il soggetto privato assumeva, in un unico affidamento, la progettazione, la costruzione, il finanziamento iniziale e la manutenzione dell'opera, rimanendo responsabile dello stato del bene per sette anni successivi alla costruzione, mentre il Comune manteneva in capo a sé l'acquisizione dei terreni e le procedure espropriative, rimborsando l'investimento mediante canoni annuali commisurati alla disponibilità e al corretto funzionamento dell'opera. La ragione di questa scelta è stata soprattutto fiscale: lo studio di fattibilità aveva stimato per Tirana la necessità di 17 nuove scuole, per un costo di circa 7,6 miliardi di ALL, in una fase in cui il bilancio annuale complessivo del Comune era pari a circa 10 miliardi di ALL e gli investimenti annui in nuove scuole non avevano superato i 500 milioni di ALL. In tale quadro il PPP consente di edificare immediatamente le scuole, dilazionando i pagamenti su sette anni, con la copertura finanziaria garantita da una tassa temporanea specifica e da trasferimenti ministeriali vincolati all'edilizia scolastica.

I vantaggi di questo modello attuativo sono evidenti: maggiore rapidità di attuazione, integrazione tra le fasi progettuali ed esecutive, responsabilizzazione dello stesso operatore per una parte consistente del ciclo di vita dell'opera e riduzione dei costi di coordinamento tra soggetti diversi. Tuttavia tale modello non è esente da limiti: il partenariato tende infatti a impegnare risorse future dell'Amministrazione attraverso obbligazioni di pagamento pluriennali, richiede una forte capacità pubblica di controllo sulla qualità e può privilegiare soluzioni efficienti sul piano gestionale ma meno sensibili alla valorizzazione del rapporto con il quartiere, se non è accompagnato da una chiara regia urbanistica. L'efficacia del modello risiede infatti nell'integrazione, entro un unico quadro contrattuale, delle fasi di progettazione, costruzione, finanziamento e manutenzione; ma proprio questa concentrazione di responsabilità rende decisiva la capacità dell'Amministrazione di definire standard prestazionali, dispositivi di verifica e criteri insediativi coerenti con una visione urbana di lungo periodo.

Accanto a questa leva la ricostruzione post-sismica ha attivato il canale della cooperazione internazionale, che dopo il terremoto del 2019 ha permesso di mobilitare risorse straordinarie per interventi urgenti su edifici danneggiati o inadeguati. Come mostrano gli studi sulla ricostruzione urbana dopo i disastri, le crisi possono aprire finestre decisionali eccezionali e concentrare le risorse su infrastrutture pubbliche strategiche (Vale and Campanella, 2005). In questo caso il vantaggio non è stato soltanto economico ma anche procedurale e culturale, poiché alcuni programmi hanno introdotto una maggiore attenzione alla sicurezza, alla partecipazione e alla qualità degli ambienti di apprendimento. L'interesse del caso di Tirana sta dunque nella coesistenza di strumenti finanziari diversi. La pluralità dei canali non garantisce di per sé qualità urbana, ma rende leggibile un punto essenziale: l'infrastruttura scolastica entra davvero nel progetto della città solo quando il finanziamento viene pensato insieme alla localizzazione, alla forma architettonica, alla gestione e alla possibilità di uso civico nel tempo.

Il rinnovamento dell'infrastruttura scolastica | Considerato nel suo insieme il programma attuato tra il 2015 e il 2025 costituisce uno dei più consistenti processi di rinnovo dell'infrastruttura pubblica recente di Tirana. La costruzione di nuove strutture, associata a interventi di manutenzione, restauro e adeguamento del Patrimonio esistente, mostra che la scuola è stata assunta come leva di politica urbana e non soltanto come comparto edilizio. La documentazione comunale sottolinea la portata di questo programma (Municipality of Tirana, 2018), che ha riguardato quartieri centrali e periferici e ha prodotto un sostanziale incremento di aule e posti-studente (Figg. 9, 10).

Dal punto di vista del progetto urbano è rilevante che la rete scolastica sia stata trattata come infrastruttura per redistribuire i servizi: nei quartieri in cui la crescita residenziale aveva preceduto la disponibilità di servizi, le nuove scuole hanno svolto una funzione di riequilibrio territoriale; dove invece il Patrimonio esistente risultava obsoleto o sottodimensionato, gli interventi hanno consentito di aggiornare aule, dotazioni e standard. In questo senso il rinnovamento del Patrimonio scolastico partecipa a un'idea di welfare urbano nella quale l'attrezzatura pubblica non risponde solo a una domanda settoriale, ma contribuisce a ricomporre disuguaglianze spaziali (Ricci, Poli and Marino, 2025; Cangelli, 2025).

La questione è confermata anche dal dibattito più recente sui rapporti tra le infrastrutture sociali, il supporto locale e la giustizia spaziale. Le scuole, specialmente nelle periferie segnate da carenza di attrezzature collettive, possono agire come presidi capaci di stabilizzare relazioni di prossimità, sostenere pratiche di quartiere e rendere più leggibile la presenza dello Stato nello spazio urbano (Fiorini et alii, 2025; Figg. 11, 12). È in questa prospettiva che va valutato il caso di Tirana: non solo per la quantità di edifici realizzati, ma anche per la capacità della rete di riabilitare parti della città rimaste a lungo sottodotate.

I tre casi studio discussi di seguito sono stati selezionati proprio per rendere visibili le tre modalità diverse con cui questa infrastruttura è stata realizzata e interpretata. La loro comparazione è funzionale a mostrare come la qualità urbana della scuola dipenda dall'intreccio tra il dispositivo finanziario, l'impianto architettonico, la configurazione del sito e la capacità di promuovere l'uso collettivo.

Il partenariato pubblico-privato per il Complesso scolastico Vaçe Zela – Kristo Frashëri | Situato nel quartiere Don Bosco, il complesso Vaçe Zela – Kristo Frashëri rappresenta il caso in cui il partenariato pubblico-privato si traduce in un'ampia dotazione scolastica a scala di quartiere. Il progetto concentra in un unico organismo due cicli di istruzione, condividendo dotazioni comuni e ottimizzando l'uso del suolo in un contesto densamente popolato. Dal punto di vista urbano questa scelta è rilevante perché mostra come la scuola possa fungere da condensatore dei servizi e da presidio capace di rafforzare la dotazione pubblica di un distretto sottoposto a forte pressione insediativa. La configurazione in corti interne crea un ambiente protetto e definisce un rapporto calibrato con il tessuto circostante, mentre la durabilità materica e la riconoscibilità del volume rafforzano l'identità pubblica dell'intervento (Figg. 13-15).

La qualità del caso studio non coincide però semplicemente con la sua dimensione; il punto cruciale è che l'edificio prova a tradurre in forma architettonica la tesi della scuola come infrastruttura civica: non solo luogo dell'istruzione, ma nodo capace di sostenere attività condivise oltre l'orario scolastico. La criticità, tipica di strutture complesse di questo tipo, riguarda la capacità di mantenere nel tempo una reale apertura alla comunità senza compromettere la sicurezza né trasformare la multifunzionalità in una mera dichiarazione programmatica.

Sostegno internazionale alla ricostruzione scolastica: la Scuola Emin Duraku | La Scuola Emin Duraku affronta il problema opposto: non quello della nuova urbanizzazione in aree dense, ma quello della ricostruzione di un presidio storico all'interno di un tessuto già saturo e segnato da occupazioni del suolo progressive. Il caso mostra con particolare chiarezza il peso dei vincoli spaziali che gravano sull'infrastruttura scolastica di Tirana. Costruita in origine secondo gli standard del periodo socialista, la scuola ha nel tempo visto ridursi parte del proprio spazio aperto a causa di costruzioni informali, successivamente sanate, con effetti rilevanti sulla disponibilità di cortili e sulla qualità del rapporto tra edificio e quartiere (Fig. 16). Dopo il terremoto del 2019 l'inadeguatezza strutturale di una porzione del complesso ha imposto un intervento radicale di ricostruzione.

Nel quadro del programma sostenuto dall'Unione Europea e attuato da UNDP (2020) Albania, l'intervento ha consentito di aumentare la superficie costruita, introdurre nuovi ambienti di apprendimento e riorganizzare gli spazi esterni entro limiti fondiari molto stringenti (Figg. 17, 18). Il punto di forza dell'intervento non sta soltanto nell'adeguamento sismico o nell'incremento dimensionale, ma nella capacità di reinterpretare un sito compromesso senza rinunciare alla qualità educativa e civica della scuola.

Questo caso mette però in luce anche una criticità strutturale della trasformazione urbana di Tirana: quando il suolo pubblico è già stato occupato o frammentato, la qualità del progetto deve confrontarsi con condizioni pregresse difficilmente reversibili. La ricostruzione, per quanto accurata, non può da sola restituire integralmente lo spazio aperto perduto; proprio per questo Emin Duraku è un caso scientificamente rilevante: mostra che il recupero dell'edilizia scolastica non coincide sempre con un'espansione lineare delle possibilità urbane, ma spesso misura la capacità del progetto di negoziare con limiti storicamente accumulati.

L'investimento comunale per la Scuola Servete Maçi | La Scuola Servete Maçi (Municipality of Tirana, 2017) rappresenta il caso in cui l'investimen-





Fig. 2 | Skanderbeg Square, Tirana: the pedestrian civic space after the 2017 redevelopment (credit: Media Office, Municipality of Tirana, 2017).

Fig. 3 | Pyramid of Tirana (Tirana) renovated by MVRDV in 2023 (credit: O. van Duivenbode, 2021).

to diretto del Comune si traduce più chiaramente in un'idea di attrezzatura scolastica come presidio culturale e civico di quartiere. La sostituzione dell'edificio con una nuova struttura dotata di laboratori, biblioteca, palestra, auditorium e spazi di supporto agli studenti mostra che una scuola può dotarsi di un programma più articolato e aperto alla vita collettiva del quartiere (Figg. 19-21). Il valore del progetto non risiede solo nell'aggiornamento tecnico o pedagogico, ma anche nella possibilità di associare alla funzione educativa un insieme di usi che rafforzano l'intensità civica dell'edificio.

In questa prospettiva Servete Maçi interpreta la scuola come un'infrastruttura di welfare locale in modo convincente. L'auditorium e gli spazi condivisi, se governati come dotazioni accessibili, permettono di estendere il campo d'azione dell'edificio alla vita culturale e associativa del quartiere, in linea con la riflessione sulle attrezzature pubbliche come infrastrutture del welfare urbano di Ricci, Poli e Marino (2025). La trasferibilità del caso è elevata, soprattutto nei contesti in cui il rinnovo dell'edilizia scolastica può diventare l'occasione per introdurre servizi collettivi nei quartieri che ne sono carenti.

Lettura cartografica e progetto architettonico-urbano: il nucleo di originalità del contributo | Il passaggio dedicato alla costruzione dell'apparato cartografico costituisce il nucleo più originale del saggio, perché trasforma la cartografia da semplice supporto illustrativo a uno strumento critico capace di riformulare il problema del progetto, in linea con quanto mostrato da Magliocco e Oneto (2023), per i quali mappe, griglie e configurazioni spaziali costituiscono dispositivi analitici utili a interrogare e verificare sistemi urbani complessi. I dati relativi alla localizzazione delle scuole, alla popolazione residente, ai tempi di percorrenza pedonale, alle fermate del trasporto pubblico, all'infrastruttura ciclabile e alla densità edilizia consentono di costruire una lettura multilivello dell'accessibilità scolastica. La procedura adottata resta esplicita e verificabile: definisce soglie temporali, misura le coperture, confronta la situazione esistente e l'incremento determinato dalle nuove strutture e mette in relazione la rete scolastica con la geografia dell'abitare.

L'aspetto più innovativo non è il ricorso ai dati territoriali in sé, oggi diffuso, ma il loro uso in una prospettiva progettuale che tiene insieme edificio, rete, prossimità e spazio pubblico. In molti casi l'analisi scolastica resta interna alla demografia o alla gestione del Patrimonio, mentre qui la lettura cartografica entra nel campo della progettazione architettonica e urbana, perché consente di valutare dove il rafforzamento della rete produca un effettivo riequilibrio territoriale, dove restino scoperte aree periferiche e dove la qualità dell'accesso dipenda da connessioni pedonali, dal trasporto pubblico o dalla disponibilità di spazi aperti.

La cartografia svolge inoltre una funzione critica rispetto alla narrazione istituzionale, perché consente di mettere in relazione dati ambientali, assetti morfologici e sistemi infrastrutturali attraverso rap-

presentazioni comparabili, come mostrano Magliocco e Oneto (2023) nel ricorso congiunto a griglie, grafi e tassellazioni per leggere criticamente tessuti urbani differenti. Dove la comunicazione pubblica tende a enfatizzare il numero degli interventi la lettura spaziale consente di valutare dove e in che misura i nuovi edifici abbiano ampliato i bacini di accesso, ridotto le distanze, rafforzato i quartieri più scoperti o migliorato l'integrazione con altre infrastrutture di mobilità. È proprio in questo passaggio che il presente saggio propone un avanzamento disciplinare: la qualità della scuola non viene giudicata solo dal manufatto, ma anche dalla sua capacità di redistribuire prossimità e cittadinanza nello spazio urbano.

Barriere e criticità dell'approccio | L'idea della scuola come infrastruttura urbana incontra, in contesti come Tirana, ma non solo, una serie di barriere che ne limitano la piena attuazione. Una prima barriera è culturale e riguarda la persistenza di una rappresentazione della scuola come edificio chiuso, monofunzionale e autosufficiente: finché l'attrezzatura scolastica viene concepita esclusivamente come contenitore di aule, diventa difficile investire nel rapporto con il suolo, con lo spazio aperto, con la sicurezza dei percorsi e con l'apertura alla comunità. Una seconda barriera è di natura economico-finanziaria: la costruzione rapida di nuove scuole può essere sostenuta da partenariati o da programmi straordinari, ma la loro efficacia per il welfare urbano dipende dalla manutenzione ordinaria, dalla gestione delle dotazioni condivise e dalla continuità del finanziamento pubblico.

Una terza barriera è normativa e istituzionale: nei contesti segnati da fenomeni di urbanizzazione informale, sanatorie successive, difficoltà di esproprio e frammentazione delle competenze, la disponibilità di suolo per nuove scuole o per l'ampliamento degli spazi aperti diventa incerta. Il caso di Emin Duraku lo rende evidente: la qualità del progetto si misura in relazione ai vincoli fondiari e giuridici accumulati nel tempo. Una quarta barriera è sociale e riguarda l'accessibilità effettiva: non tutti gli utenti sperimentano allo stesso modo la prossimità, la sicurezza e la qualità dei percorsi; differenze di età, genere, condizione economica e capacità di movimento possono rendere un servizio apparentemente accessibile carente.

Trasferibilità e linee di indirizzo per processo, progetto, prodotto e servizio | L'esperienza di Tirana ha carattere di trasferibilità ad altri contesti, ma soltanto se si assumono come oggetto di trasferimento le condizioni operative e non gli esiti tangibili. Sul piano del processo la prima condizione è l'integrazione tra pianificazione urbana, politiche della mobilità, gestione del suolo e programmazione educativa; senza questa condizione la scuola tende a essere collocata in una posizione marginale e a perdere la possibilità di agire come infrastruttura redistributiva. Sul piano del progetto occorre considerare la relazione tra edificio, soglie di accesso, spazi aperti e quartiere come parte integrante del programma architettonico, e non come tema secondario. Sul piano del prodotto edilizio i casi discussi suggeriscono che la scuola contemporanea deve essere durevole, con funzioni differenti e 'aperte', chiaramente riconoscibile come edificio pubblico e capace di ospitare gradi differenziati di apertura verso la comunità.

Sul piano del servizio infine la qualità dipende dalla capacità di far vivere la scuola oltre l'orario didattico attraverso gestione, manutenzione, presidio e regole d'uso. La trasferibilità disciplinare del contributo supera peraltro il solo ambito dell'edilizia scolastica: la lettura proposta può interessare anche altre infrastrutture di prossimità – biblioteche, attrezzature sportive, presidi socio-sanitari, centri civici – perché mette a fuoco un principio generale del progetto urbano contemporaneo: la qualità di un servizio pubblico dipende dalla sua capacità di organizzare relazioni spaziali, accessibilità e uso collettivo, non dalla sola efficienza interna dell'edificio.

Limiti del punto di vista proposto | Il contributo presenta limiti che vanno chiaramente indicati. Il primo limite riguarda la natura dei dati utilizzati: l'apparato cartografico rende più rigorosa l'interpretazione, ma resta dipendente dalla qualità e dall'omogeneità dei dati e delle informazioni disponibili; le soglie temporali di accessibilità, necessarie per condurre confronti, semplificano inoltre le pratiche di mobilità, che nella realtà sono più complesse e differenziate. Il secondo limite riguarda la mancanza di una valutazione post-occupativa sistematica dei casi studio: il saggio discute criticamente i progetti sulla base del loro impianto architettonico, del quadro istituzionale e delle evidenze cartografiche, ma non dispone di una campagna estesa di osservazione diretta delle pratiche d'uso nel tempo.

Un terzo limite riguarda il carattere inevitabilmente specifico del caso di Tirana: la storia urbana post-socialista, i meccanismi di urbanizzazione informale, il peso della ricostruzione post-sismica e la configurazione amministrativa della capitale albanese costituiscono un quadro specifico, non integralmente sovrapponibile ad altri contesti. La trasferibilità proposta va dunque intesa come trasferibilità di principi e di metodo, non come ripetizione di assetti istituzionali o tipologici identici.

Sinergie e compromessi con i 17 SDG | Interpretata come infrastruttura urbana la scuola non esaurisce il proprio contributo nell'SDG 4, ma intercetta un insieme più ampio di SDG la cui effettiva attivazione dipende tuttavia da precise condizioni di localizzazione, accessibilità, progetto e gestione. Il punto importante in questa prospettiva non è affermare in modo generico che un'adeguata infrastruttura scolastica contribuisca a tutti gli SDG, ma chiarire in quali condizioni essa possa operare come dispositivo redistributivo, all'interno di un approccio sistemico e integrato in cui le interconnessioni tra obiettivi risultano determinanti per la qualità dello spazio urbano, capace di incidere sulle disuguaglianze territoriali e sulla prossimità dei servizi.

È soprattutto su questo terreno che il caso di Tirana mostra la sua maggiore rilevanza, chiamando direttamente in causa, oltre all'SDG 4, gli SDG 10 e 11: la rete scolastica non agisce infatti solo come dotazione educativa, ma come infrastruttura pubblica che ridisegna i rapporti tra quartieri, tempi di accesso, opportunità d'uso e presenza istituzionale nello spazio urbano, promuovendo accessibilità, equità e senso di appartenenza allo spazio pubblico in linea con l'idea analizzata da Cellucci, Revellini e Tatano (2025) che gli spazi urbani debbano rispondere ai bisogni dell'intera popolazione attraverso un paradigma inclusivo.

Da questa soglia principale si irradiano altri possibili effetti, che però non vanno intesi come esiti automatici. La scuola può concorrere all'SDG 3 quando sostiene salute, sicurezza, attività fisica e mobilità attiva; all'SDG 5 quando accessibilità, inclusione e fruizione non riproducono gerarchie d'uso o barriere implicite; agli SDG 6 e 7 quando l'edificio integra in modo verificabile strategie relative all'acqua, all'energia e alla riduzione dei consumi; agli SDG 12 e 13 quando il progetto considera durabilità, ciclo di vita, adattamento e resilienza; agli SDG 16 e 17 quando l'intervento è sostenuto da una regia pubblica capace di coordinare attori, risorse e responsabilità. In forma più indiretta, e sempre mediata dal contesto, il progetto scolastico può inoltre interferire con gli SDG 1, 2, 8, 9, 14 e 15, nella misura in cui riduce le condizioni di marginalità educativa, sostiene pratiche alimentari e di cura, attiva filiere di costruzione e manutenzione, orienta l'innovazione tecnica e limita la pressione su suolo, risorse ed ecosistemi.

Proprio per questa natura multiscalare il rapporto tra la scuola e gli SDG deve essere interpretato in termini di compromessi anche tra istanze diverse. L'ampliamento della copertura territoriale può rafforzare ad esempio equità e prossimità, ma può anche tradursi in un nuovo consumo di suolo se non è accompagnato da un'attenta regia urbanistica. Analogamente il partenariato può accelerare l'attuazione e ampliare la capacità d'intervento, ma tende anche a trasferire nel futuro quote di spesa vincolata, richiedendo al settore pubblico elevate capacità di controllo, monitoraggio e riequilibrio delle risorse economiche.

Anche la concentrazione di funzioni in complessi scolastici di grandi dimensioni comporta evidenti compromessi: da un lato incrementa l'efficienza, le dotazioni e la potenziale apertura civica, dall'altro può ridurre la diffusione capillare del servizio, indebolire il rapporto di prossimità con l'intorno e risultare meno aderente ai ritmi quotidiani del quartiere. Nello stesso modo l'apertura della scuola alla comunità amplia le possibilità d'uso e la densità relazionale dell'infrastruttura, ma introduce esigenze non secondarie di gestione, sicurezza, manutenzione e presidio, richiedendo il coinvolgimento coordinato di una molteplicità di attori e una regia pubblica capace di guidare processi complessi (Cellucci, Revellini and Tatano, 2025).

In questa prospettiva, il contributo della scuola agli SDG non può essere descritto come una somma lineare di benefici, ma va inteso come il risultato di valutazioni progettuali e politiche su obiettivi talvolta convergenti, talvolta conflittuali. L'interesse del caso di Tirana risiede precisamente in questo: mostra che la scuola può agire come infrastruttura urbana a elevata capacità redistributiva solo quando il progetto edilizio è inserito in una più ampia razionalità pubblica, capace di tenere insieme accesso, qualità spaziale, dotazione civica, sostenibilità ambientale e governo di lungo periodo. In assenza di tale regia il richiamo agli SDG rischia di restare prevalentemente dichiarativo.

Riflessioni conclusive | Il caso di Tirana consente di formulare una tesi che, più che chiudere il discorso, chiede di essere rimessa al centro del dibattito disciplinare: la scuola costituisce una delle poche infrastrutture pubbliche in cui si rendono simultaneamente leggibili la qualità del progetto edilizio, la riduzione delle disuguaglianze nella distribuzione dei servizi e la vocazione civica dello spazio urbano: la sua rilevanza dunque eccede larga-







Figg. 4-6 | Vaçe Zela – Kristo Frashëri school complex, Don Bosco neighbourhood in Tirana: educational complex, designed by Stefano Boeri Architetti (credits: L. Masotto and M. Selmani, 2024).

mente il perimetro della sua architettura. Ogni volta che una città costruisce, ricostruisce o rilocalizza una scuola, non interviene soltanto su un edificio o su una dotazione funzionale, ma ridefinisce distanze, soglie di accesso, tempi di percorrenza, gerarchie insediative, possibilità di uso collettivo e forme concrete della presenza pubblica nei quartieri. In questo senso l'infrastruttura scolastica può essere considerata uno dei dispositivi attraverso cui la città distribuisce prossimità, opportunità e cittadinanza. L'elemento di maggiore interesse che emerge dal caso Tirana non risiede tuttavia nella semplice efficacia quantitativa del programma realizzato, né nella sola qualità architettonica di alcuni edifici, ma nella possibilità di reinterpretare la rete scolastica come questione propriamente urbana. È in questo cambio di prospettiva che il saggio colloca il proprio contributo: sottrarre la scuola sia a una lettura riduttivamente tecnico-amministrativa, centrata su standard, costi e tempi di esecuzione, sia a una narrazione prevalentemente iconica, concentrata sul valore isolato del singolo manufatto, per ricondurla invece entro una razionalità progettuale che tiene insieme edificio, rete, accessibilità, spazio aperto e funzioni civiche e che può tradursi, come mostrano Setola e Borgianni (2025), in veri e propri strumenti di supporto alle decisioni per le PA e i progettisti. Pertanto la scuola appare come un banco di prova particolarmente esigente per verificare la capacità dell'architettura e dell'urbanistica di produrre effetti redistributivi misurabili nello spazio urbano.

I casi considerati mostrano infatti che la qualità della scuola contemporanea non coincide né con l'adozione di un linguaggio architettonico specifico né con un unico modello procedurale o finanziario. Essa dipende piuttosto dalla capacità di trasformare l'edificio in un nodo attivo di una rete territoriale, di costruire relazioni leggibili e accessibili con lo spazio pubblico, di garantire una prossimità effettiva e differenziata ai servizi e di rendere possibile un uso civico dell'infrastruttura oltre il tempo strettamente scolastico. In questa prospettiva la scuola è tanto più rilevante quanto più riesce a operare come infrastruttura redistributiva, cioè come dispositivo capace di ridurre gli squilibri territoriali, attenuare la marginalità insediativa e rafforzare la presenza di beni pubblici nei contesti ordinari della vita urbana.

Al tempo stesso il caso di Tirana invita a evitare letture celebrative: la sua trasferibilità in altri contesti non dipende dalla riproduzione formale degli esiti visibili, ma dalla capacità di riconoscere le condizioni operative che ne hanno reso possibile l'attuazione: continuità della regia pubblica, centralità della questione insediativa, integrazione tra decisione urbanistica e progetto architettonico, disponibilità di strumenti attuativi adeguati, capacità di controllo da parte della PA e chiara assunzione del valore pubblico della scuola oltre il solo servizio formativo pubblico.

In questo senso è utile richiamare da un lato lo studio di Setola e Borgianni (2025) secondo cui la metodologia diventa replicabile proprio quando assume il quartiere come unità di lavoro e costruisce dispositivi trasferibili anche in contesti urbani differenti, dall'altro lo studio di Ferrante, Romagnoli e Villani (2023) perché mostra come l'organizzazione e la comunicazione dei dati, la lettura dei fattori abilitanti e la strutturazione di schede e database possano supportare una pianificazione basata sull'evidenza e rendere più trasferibili le buone pratiche tra contesti differenti. Quando queste condizioni vengono meno, il rischio è duplice: da un lato la scuola può tornare a essere trattata come un'attrezzatura dell'istruzione, da collocare secondo logiche di marginalità nell'impianto urbano, dall'altro il richiamo all'innovazione può risolversi in un avanzamento solo apparente, incapace di incidere sulle strutture profonde della disuguaglianza urbana.

È proprio su questo terreno che il saggio apre una linea di ricerca ulteriore che interessa direttamente sia il progetto sia le politiche pubbliche: servono studi capaci di integrare analisi morfologiche, valutazioni post-occupazionali, osservazione delle pratiche d'uso, misurazioni puntuali dell'accessibilità differenziata per età, genere e condizione sociale, nonché verifiche sulla capacità delle scuole di agire come presìdi di welfare di prossimità, di salute urbana e di adattamento climatico. Analogamente sul piano metodologico appare sempre più necessario costruire quadri valutativi in grado di leggere insieme la performance edilizia, il ruolo urbano, l'apertura civica, la sostenibilità gestionale e l'impatto redistributivo, superando la tradizionale separazione tra indicatori tecnici, criteri pedagogici e parametri urbanistici; in questo senso lo studio di Setola e Borgianni (2025) è particolarmente rilevante perché mostra come scenari progettuali, linee guida tecniche e schede metaprogettuali possano articolarsi come strumenti operativi per leggere congiuntamente qualità urbana, salute e benessere di prossimità.

Per la comunità scientifica l'interesse del caso Tirana non consiste dunque soltanto nell'offrire un repertorio di buone pratiche, ma nel proporre una diversa chiave interpretativa: assumere la scuola come osservatorio privilegiato per comprendere come le città costruiscono o indeboliscono l'equità spaziale attraverso il progetto. In questa accezione la questione scolastica non appartiene soltanto al campo dell'edilizia di settore, ma investe direttamente il modo in cui si configurano la responsabilità pubblica del progetto, la capacità redistributiva delle istituzioni e la qualità democratica dello spazio urbano. Se assunta con questa consapevolezza la scuola può tornare a essere non tema specialistico a parte, ma uno dei luoghi decisivi in cui architettura, urbanistica e politiche pubbliche misurano la propria capacità di costruire città più eque, accessibili, prossime e durevoli.

In contemporary debates on urban planning, schools can no longer be understood as mere containers of the educational function. Their location, their accessibility, and their relationship with open spaces affect everyday life, organise flows, confer centrality, and make visible how the city distributes opportunities, services, and proximity. In this perspective, the school should be understood as a civic infrastructure: a device that connects the building, the neighbourhood, mobility, public space, and forms of collective living. This interpretation finds an initial foundation in the reflections of Henri Lefebvre (1991), for whom space is a social product, and in the reading of Aldo Rossi (1982), who traces the city back to the longue durée of its civic and institutional permanences. Within this framework, the school does not exhaust its meaning in responding to a sectoral need, but participates in the material and symbolic construction of the urban realm, sedimenting recognisability, continuity, and collective memory.

The same interpretative line is reinforced when considering the vitality of public space and the fine-grained dimension of neighbourhood life. Jane Jacobs (1961) shows how the ordinary rhythms of the city generate safety and a high level of use through the widespread presence of activities and people; Jan Gehl (2011), on the other hand, emphasises the need to design contexts tailored to everyday practices and social interactions. School entrances, access routes, sidewalks, and waiting areas function precisely within this intermediate threshold where the educational service meets the city and sustains its ordinary use. These spaces can also be read as observable devices of everyday public life, in line with the methodological approach proposed by Jan Gehl and Birgitte Svarre (2013), who encourage the systematic study of interactions between the built environment and patterns of use. It is worth noting, however, according to Cellucci, Revellini, and Tatano (2025), that the design of public space has traditionally been centred on the experience of a 'standard user' (male and able-bodied), a methodological choice that has systematically overlooked the specific needs of women, the elderly, and people with disabilities.

In this context, the school can also be interpreted as an instrument for overcoming this partial vision, by adopting a systemic and intersectional approach capable of encompassing the different ways of inhabiting the city.

The issue gains further relevance when considered from the perspective of proximity. The literature on walkability highlights that the quality of a neighbourhood depends on the relationship between density, functional mix, connectivity, and accessibility to everyday services (Talen and Koschinsky, 2013). In this regard, Emily Talen (2019) emphasises the need to organise neighbourhood units so that essential services are reachable on foot; in this perspective, the school becomes one of the most eloquent indicators of settlement equity. The same trajectory is developed by planning models based on proximity, such as the '15-minute city' proposed by Carlos Moreno, which allows the school network to be read as a decisive anchor within polycentric urban systems (Moreno et alii, 2021). To this is added the contribution of Lia Karsten and Willem Van Vliet (2006), who place children's independent mobility at the centre of the social and spatial quality of neighbourhoods. Finally, it is also relevant to recall research that explicitly considers schools as multifunctional territorial hubs: in this direction, Valente et alii (2024) show how school institutions can be reinterpreted as focal points of 'sustainable urban communities'.

Taken together, these interpretative keys make it possible to understand schools as public infrastructures capable of simultaneously influencing the quality of learning and urban quality. In this perspective, infrastructure is not merely a technical support, but a form of organisation of social life and everyday practices, configuring itself as 'lively infrastructure' (Amin, 2014). This approach is consistent with the framework of the United Nations Sustainable Development Goals (SDGs; UN, 2015), particularly with regard to education, infrastructure, the reduction of inequalities, and sustainable cities; however, its relevance for architectural and urban design goes beyond mere alignment with interna-

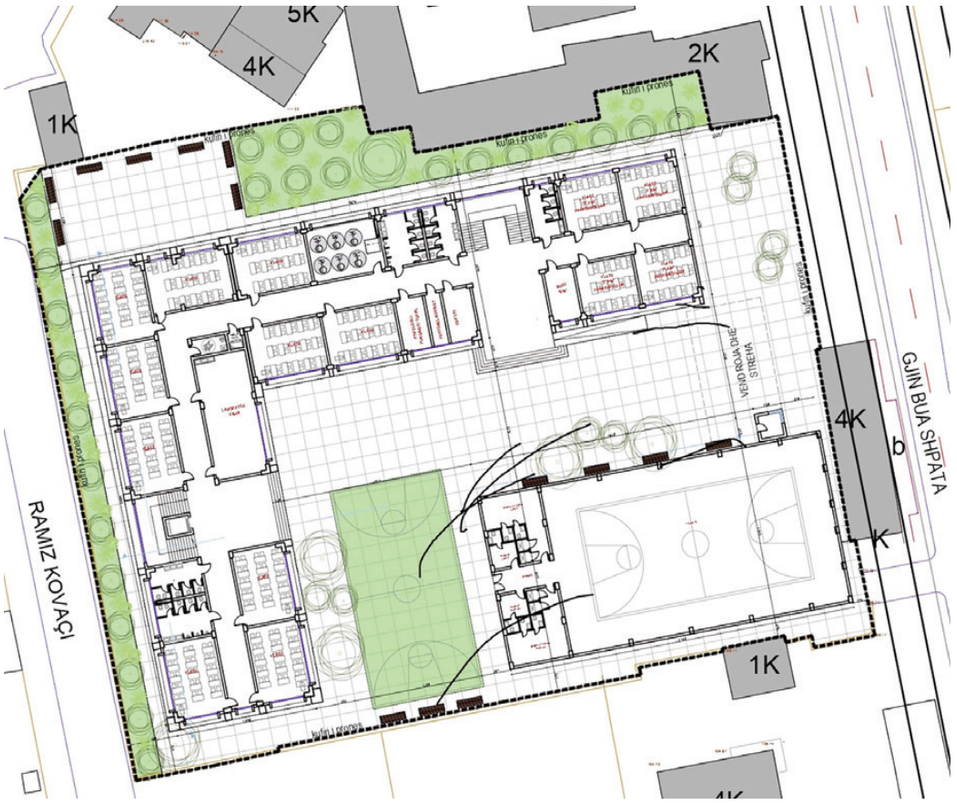


Fig. 7 | Plan of the Emin Duraku School in Tirana: the grey volumes indicate informal buildings within the school perimeter that occupy part of the original open space (credit: HT Construction, 2021).

Next page

Figg. 8, 9 | Emin Duraku School in Tirana: exterior façade and courtyard of the reconstructed school building under the EU4Schools Programme (credits: UNDP Albania, 2024).

tional objectives: it compels a critical examination of the relationship between the form of the city, the distribution of services, and spatial justice.

Within this framework, the case of Tirana assumes particular significance. The Albanian capital today presents conditions that are crucial for contemporary design: rapid metropolitan growth, informal expansion, demographic pressure, incomplete redistribution of services, and the redefinition of urban policies in the transition from a post-socialist city to a complex metropolitan system[1] (Secchi, 2013). This paper takes these conditions as a testing ground for a precise thesis: when the school network is conceived together with mobility systems, open spaces, and neighbourhood practices, it can operate as a redistributive urban infrastructure and as a design lever for a more accessible and less unequal city.

The methodology adopted is of a critical-interpretative nature, yet remains rigorous, as the paper weaves together four operations: a theoretical framing of the relationship between schools and urban form; an analysis of planning instruments and implementation mechanisms that have supported school renewal; the discussion of three case studies selected because they represent three distinct intervention regimes – public-private partnership, reconstruction financed through international cooperation, and direct municipal investment; and finally, a cartographic reading of accessibility and catchment areas, considered not as an illustrative support but as an interpretative device for design.

The originality of the contribution lies primarily in the shift of focus from the individual building to the school network as an infrastructure of the public city; this transition finds a useful comparative reference in the study by Valente et alii (2024), in which the secondary school is conceived as a civic-environmental hub and an operational support for Public Administrations (PAs), developing a methodology that integrates simulations, indicators, and territorial impact assessments. Rather than interpreting schools merely as artefacts to be upgraded or as isolated architectural episodes, the paper considers them as nodes through which to measure the coherence between planning instruments, territorial distribution, the quality of open space, and the capacity to activate collective use. In this way, the contribution may be of interest to the scientific community not only because it discusses a current case, but also because it proposes a transferable framework for repositioning school infrastructure at the centre of architectural and urban design.

The structure of the text reflects this approach. Following the introductory framework, the paper analyses the transformation of Tirana within the context of its recent urban agenda, discusses the planning instruments and financial mechanisms that have enabled the renewal of the school network, critically interprets three emblematic case studies, develops the methodological and original core of the contribution through a cartographic reading of the network, addresses barriers, transferability, and limitations, and finally, through two concluding sections – one dedicated to synergies and trade-offs with the 17 SDGs and the other to final conclusions – offers reflections aimed at opening the debate on the topic under discussion.

Theory of change in Tirana and political vision: urban regeneration and a 'child-centred' agenda | The transformation of school infrastructure in the Albanian capital must be understood in light of the processes of metropolitan growth, informal development, and the incomplete redistribution of infrastructure that have shaped the city since 1991 (Aliaj and Haxhiu, 2025). Within a few decades, Tirana has shifted from a relatively compact administrative centre to the country's main urban pole, concentrating population, economic activities, and institutional functions (World Bank Group, 2007; INSTAT, 2024)[2]. Growth has often occurred through forms of urbanisation that outpaced the capacity for territorial governance: edges built informally or semi-formally, disordered connections between the consolidated city and new neighbourhoods, progressive occupation of public spaces, and the compression of collective facilities (Bateman, 2019; Fig. 1). Within this context, school infrastructure has also been subject to evident pressures, as courtyards and open areas have been reduced, occupied, or fragmented, with direct effects on the quality of educational spaces and on their civic function (Figg. 2, 3).

From a design perspective, the problem is that the geography of residence and that of services have not developed synchronously: in many recently formed neighbourhoods, the provision of schools, public spaces, and mobility infrastructure has arrived late or in insufficient measure, making visible persistent forms of territorial inequality attributable to processes of infrastructural fragmentation (Graham and Marvin, 2001). The issue of schooling should therefore be understood not as a separate segment of education policy, but as a field in which the redistributive capacity of planning and the material consistency of the public city are tested.

The decade 2015-2025 marks, in this respect, a shift in approach. The General Regulatory Plan of the Municipality of Tirana (Boeri, 2016), developed in collaboration with Stefano Boeri Architetti and an international team of experts[3], places pu-

blic space, accessibility, and social infrastructure back at the centre, seeking to replace predominantly reactive growth with a more intentional strategy of urban rebalancing. In this transition, the philosophy of the 'child-friendly city' is not merely political communication, but invokes, at least in intention, the link between urban quality, safety, proximity-based mobility, and the right of younger generations to the city, following the principles of the Urban 95 Agenda[4] (Beck and Kaune, 2025) and in coherence with the reflections of Jan Gehl (2010) and Karsten and Van Vliet (2006).

The redevelopment of Skanderbeg Square[5] is often taken as a symbol of this new urban agenda (Fig. 4); however, for the topic addressed here, its relevance lies not only in the public image it produces, but in the political signal it conveys: restoring centrality to pedestrian space, collective uses, and cultural facilities means creating a favourable framework for reconsidering schools as distributed urban infrastructures. In this regard, municipal documentation on the redevelopment of the civic centre constitutes a useful reference (Municipality of Tirana, 2017). In the same direction move, on the one hand, the functional transformation of the Pyramid of Tirana[6] (Fig. 5) into the TUMO Center for Creative Technologies, which has converted a building constructed in 1988 as a museum dedicated to Enver Hoxha into an educational infrastructure oriented toward youth training and digital innovation, and on the other hand, the progressive expansion of the cycling network and accessibility to public transport, demonstrating how everyday mobility has been assumed as a structural component of urban life (Figg. 6, 7).

Against this background, interventions on the streets surrounding school facilities also acquire significance (Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit, 2024): traffic calming initiatives, temporary closures, and the reorganisation of access thresholds can be interpreted in light of the tactical urbanism described by Lydon and Garcia (2015), but they become truly effective only when they do not remain episodic actions. If their value lies in making the relationship between school, street, and neighbourhood safer and more legible, their limitation emerges when such measures are not supported by a stable policy of redistributing facilities and strengthening public space.

For this reason, Tirana is of interest not so much as a celebratory case of a 'city for children' (Kuris, 2019), but as a critical laboratory in which urban design measures its effectiveness when confronted with the ordinary demand for services and the need to mend a city that has grown asymmetrically. If large-scale urban interventions define the





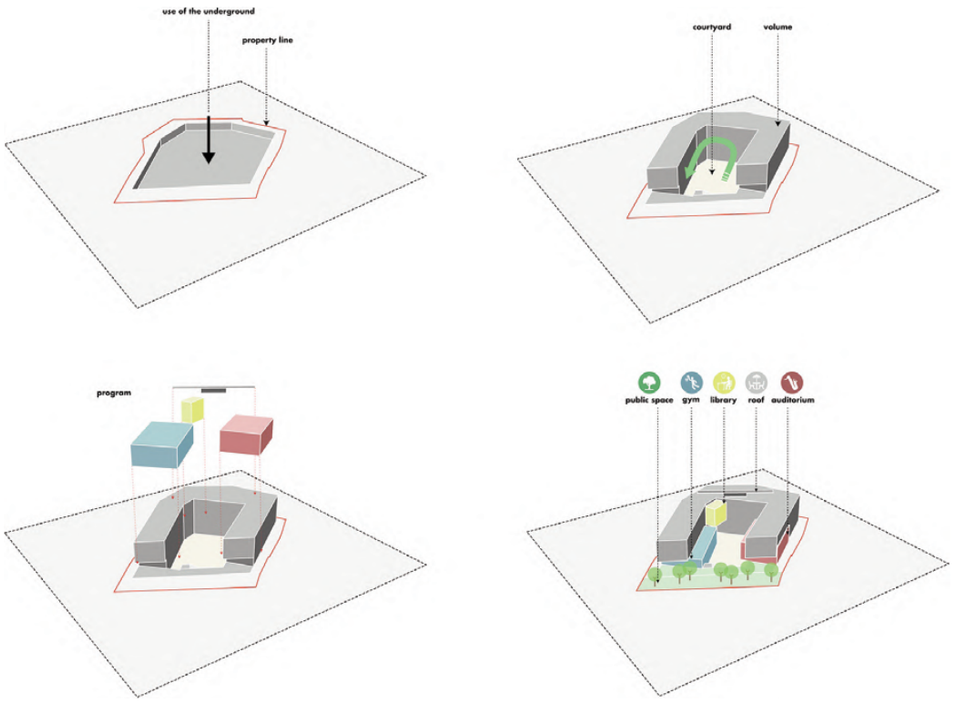


Fig. 10 | Conceptual diagram of the Servete Maçi school development process, showing site constraints, courtyard formation, programme distribution and public functions (credit: Arkonstudio, 2016).

Next page

Figg. 11, 12 | Servete Maçi School in Tirana: exterior façade and courtyard (credits: Studio Arch4, 2019).

imaginary of transformation, it is the school network that verifies whether this change actually produces proximity, accessibility, and redistribution.

Planning instruments and technical assessment of school infrastructure needs | The renewal of Tirana's school network was not initiated as a sum of episodic interventions, but rather as a response to a technical framework that highlighted the gap between settlement demand and the capacity of public provision. The feasibility study prepared by the Municipality adopted educational standards and spatial indicators to measure capacity, overcrowding, territorial distribution, and accessibility of existing schools, in reference to the regulations and standards for the design of schools in the pre-university system (Ministry of Education and Sports, 2015). The importance of this analytical phase lies not simply in quantifying a deficit; more importantly, it shifted the school issue from being an internal administrative concern within the education sector to an urban issue – thus making it a matter of planning, location, and territorial equity.

Strategic Project 07 of the General Regulatory Plan, dedicated to an extensive network of open schools, explicitly incorporates educational infrastructure into the construction of the public city. Schools are thus interpreted as multifunctional civic nodes, capable of supporting community activities and contributing to the formation of neighbourhood centralities integrated with public spaces and local mobility systems. At the same time, detailed planning instruments, such as Partial Development Plans (PDVs), are tasked with ensuring that the provision of new facilities does not remain abstract, but is translated into the safeguarding of land and its integration with residential growth.

Both the feasibility study and the strategic framework of the General Regulatory Plan provided the analytical and spatial basis for the implementation of the Public-Private Partnership (PPP) programme for school construction and have subsequently been used as reference frameworks in planning processes activated after the 2019 Albania earthquake, which required the reconstruction and upgrading of several school facilities in the metropolitan area (Fig. 8).

From a disciplinary standpoint, this shift is significant because it overturns a consolidated hierarchy: it is no longer the school that must simply adapt to urban growth, but rather urban growth that must also be assessed according to its capacity to incorporate infrastructures for education, public space, and accessibility. The strength of this framework lies in its attempt to integrate strategic vision with implementation rules; its criticality, however, emerges when land availability, timelines for land expropriation, real estate pressure, and administrative fragmentation make it difficult to translate planning provisions into realised projects.

Financial mechanisms for the development of school infrastructure in Tirana: public investment, partnerships, and international support | The implementation of the school programme in Tirana has been made possible by a complex financial arrangement that intertwined PPPs, international cooperation, and municipal investment. This diversification of funding sources was a strategic choice that enabled the Municipality to accelerate infrastructure delivery while responding to the growing demand driven by demographic growth and spatial inequalities.

Municipal resources supported the largest share of interventions, financing the construction or reconstruction of 22 schools, while 9 schools were delivered through PPP schemes. In addition, further interventions were made possible through international cooperation and targeted donations, including 4 schools financed through programmes implemented with the United Nations Development Programme and 3 schools supported by the Qatar Fund for Development, alongside smaller-scale initiatives promoted by international foundations and diplomatic missions. These contributions were mobilised particularly after the 2019 Albania earthquake, when the Donors' Conference for Albania, held in Brussels in February 2020, brought together governments, international organisations, and development agencies to support the reconstruction of damaged infrastructure.[7]

In the model adopted by the Municipality, the partnership was not used merely as a contractual formula, but as a mechanism to anticipate public investment in the presence of high demand and insufficient ordinary spending capacity. It consisted of an integrated scheme in which the private partner assumed, within a single contract, the design, construction, initial financing, and maintenance of the facility, remaining responsible for its condition for seven years after completion. Meanwhile, the Municipality retained responsibility for land acquisition and expropriation procedures, reimbursing the investment through annual payments linked to the facility's availability and proper functioning.

The rationale behind this choice was primarily fiscal: the feasibility study estimated the need for 17 new schools in Tirana, with a total cost of approximately 7.6 billion ALL, at a time when the Municipality's total annual budget was around 10 billion ALL and annual investments in new schools did not exceed 500 million ALL. In this context, the PPP model made it possible to build schools immediately while spreading payments over seven years, with financial coverage ensured by a specific temporary tax and earmarked ministerial transfers for school construction.

The advantages of this implementation model are clear: faster delivery, integration between design and execution phases, accountability of a single operator across a significant portion of the asset's life cycle, and reduced coordination costs among multiple actors. However, the model is not without limitations. Partnerships tend to commit future administrative resources through multi-year


SHKOLLA 9 VJEÇARE
SERVETE MAÇI
PALESTR


AUDITORI

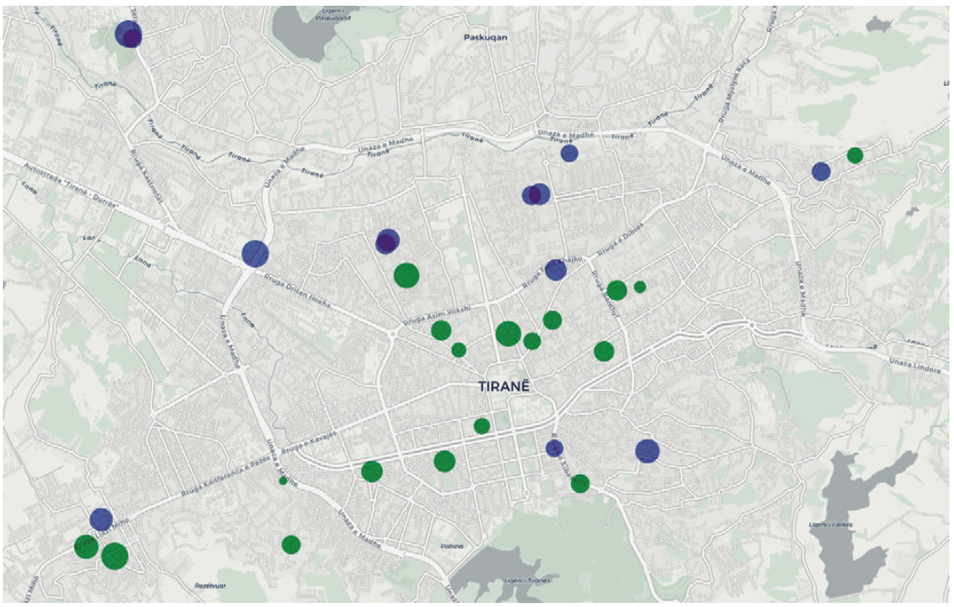
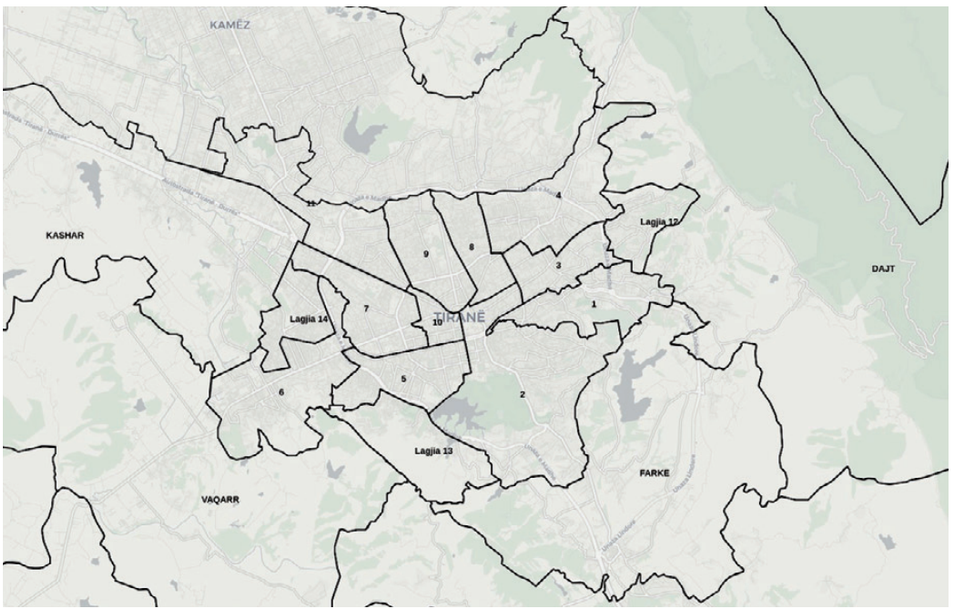
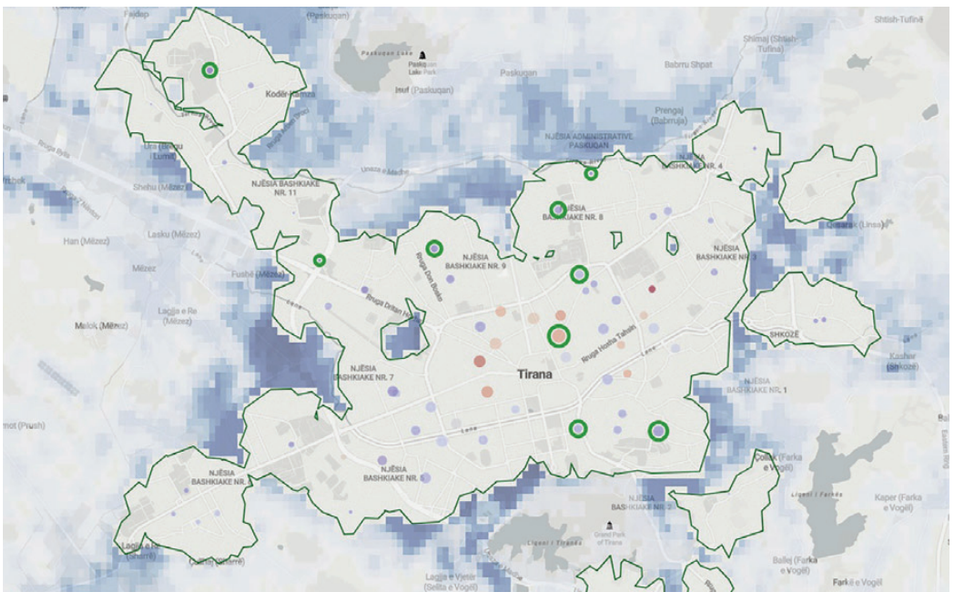


Fig. 13 | The map displays schools with positive added built-up area from 2013 to 2026. Each school is shown as a circle marker, with the radius proportional to the amount added. Blue markers indicate newly created schools, and green markers indicate expansions of existing schools (credit: the Authors, 2026).

Fig. 14 | The map illustrates the urban municipal administrative units in the city of Tirana. The area of interest includes the 11 urban administrative units, as well as the recently added neighbourhoods: Lagjia 12, 13, and 14 (credit: the Authors, 2026).

Fig. 15 | Primary schools in Tirana. The radius of each school indicates the estimated population living within its catchment area. The colour of each circle indicates the ratio of the school's population to its area. Darker red schools have a higher population/sqm ratio, while darker blue schools have a lower one (credit: the Authors, 2026).





payment obligations, require strong public capacity to control quality, and may prioritise management efficiency over sensitivity to the relationship with the neighbourhood if not guided by a clear urban vision. Its effectiveness ultimately depends on integrating design, construction, financing, and maintenance within a single contractual framework; yet this very concentration of responsibilities makes the public authority's ability to define performance standards, monitoring mechanisms, and settlement criteria aligned with a long-term urban vision decisive. Alongside this financial lever, post-earthquake reconstruction activated the channel of international cooperation, which, following the 2019 earthquake, made it possible to mobilise extraordinary resources for urgent interventions on damaged or inadequate buildings.

As studies on post-disaster urban reconstruction have shown, crises can open exceptional decision-making windows and concentrate resources on strategic public infrastructure (Vale and Campanella, 2005). In this case, the benefit was not only economic, but also procedural and cultural, as some programmes introduced greater attention to safety, participation, and the quality of learning environments. The interest of the Tirana case thus lies in the coexistence of different financial instruments. This plurality of channels does not in itself guarantee urban quality, but it makes a crucial point visible: school infrastructure truly becomes part of the urban project only when financing is conceived together with location, architectural form, management, and the possibility of civic use over time.

The renewal of school infrastructure | Considered as a whole, the programme implemented between 2015 and 2025 constitutes one of the most substantial processes of public infrastructure renewal in recent Tirana. The construction of new facilities, combined with maintenance, restoration, and upgrading interventions of the existing stock, shows that the school has been adopted as a lever of urban policy and not merely as a building sector. Municipal documentation highlights the scope of this program (Municipality of Tirana, 2018), which has involved both central and peripheral neighbour-

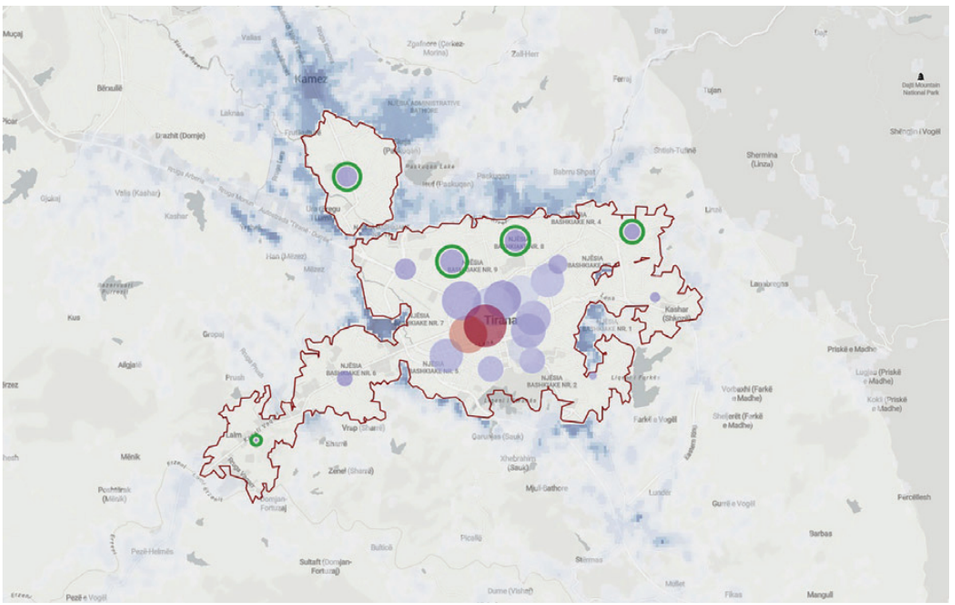


Fig. 16 | Secondary schools in Tirana. The radius of each school indicates the estimated population living within its catchment area. The colour of each circle indicates the ratio of population / the area of the school. Darker red schools have a higher population / sqm ratio within the school area; darker blue schools have a lower population / sqm ratio (credit: the Authors, 2026).

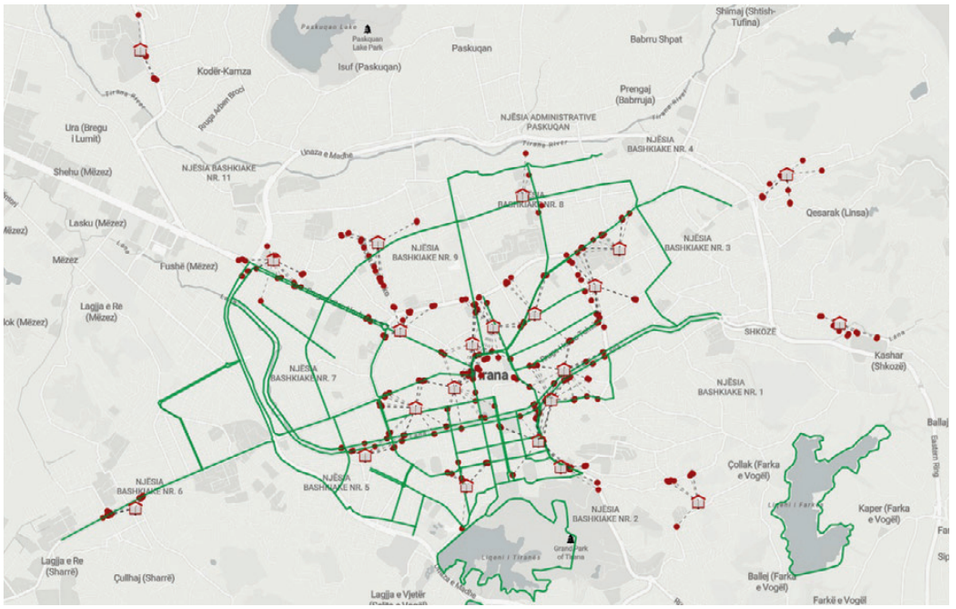


Fig. 17 | Secondary schools in Tirana, as well as all public bus stations within 500 metres of each school. The green lines represent the dedicated protected cycle lane (credit: the Authors, 2026).

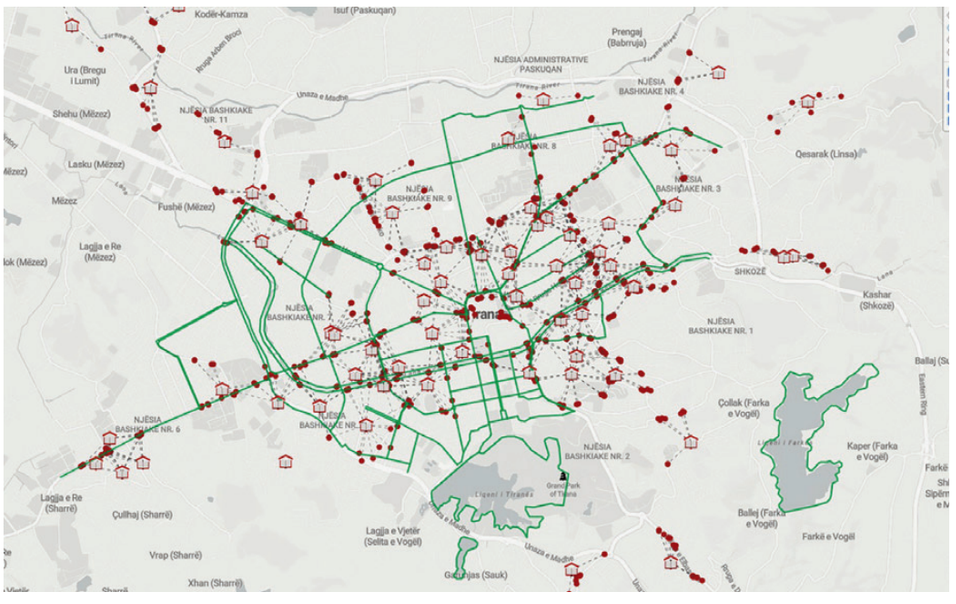


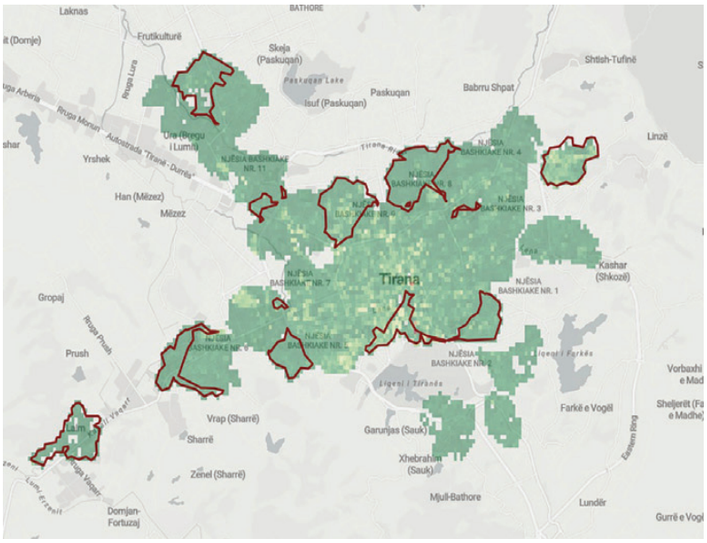
Fig. 18 | Primary schools in Tirana, as well as all public bus stations within 500 metres of each school. The green lines represent the dedicated protected cycle lane (credit: the Authors, 2026).

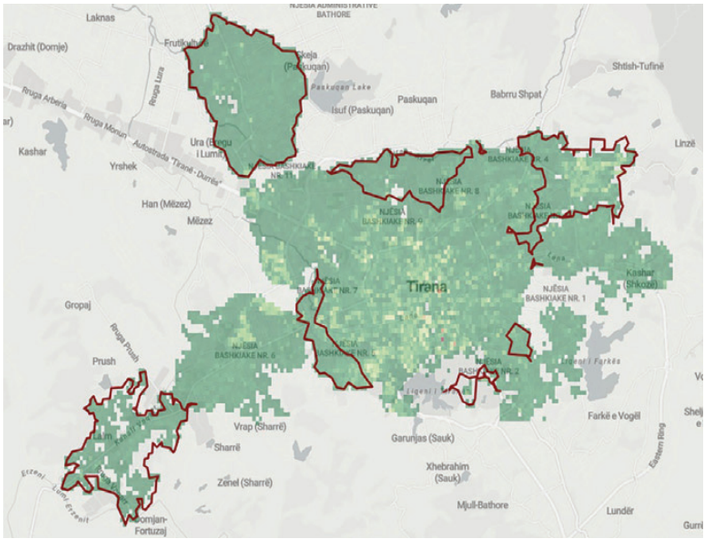
hoods and has led to a significant increase in classroom capacity and student numbers (Figg. 9, 10). From the perspective of urban design, it is significant that the school network has been treated as infrastructure for redistributing services: in neighbourhoods where residential growth had preceded the availability of services, new schools have played a role of territorial rebalancing; where, instead, the existing stock proved obsolete or undersized, interventions have made it possible to update classrooms, facilities, and standards. In this sense, the renewal of the school stock participates in an idea of urban welfare in which public facilities do not merely respond to a sectoral demand, but contribute to recomposing spatial inequalities (Ricci, Poli and Marino, 2025; Cangelli, 2025).

This issue is also confirmed by the most recent debate on the relationships between social infrastructure, local support, and spatial justice. Schools, especially in peripheral areas marked by a lack of collective facilities, can act as anchors capable of stabilising proximity relations, supporting neighbourhood practices, and making the presence of the state in urban space more legible (Fiorini et alii, 2025; Figg. 11, 12). It is from this perspective that the case of Tirana should be evaluated: not only for the quantity of buildings realised, but also for the capacity of the network to reconnect parts of the city that have long remained underserved.

The three case studies discussed below have been selected precisely to make visible the three different ways in which this infrastructure has been implemented and interpreted. Their comparison shows how the school's urban quality depends on the interplay among the financial mechanism, the architectural scheme, the site configuration, and the capacity to promote collective use.

The public-private partnership for the Vaçe Zela – Kristo Frashëri school complex | Located in the Don Bosco neighbourhood, the Vaçe Zela – Kristo Frashëri complex represents the case in which the public-private partnership translates into an extensive school provision at the neighbourhood scale. The project concentrates on two levels of education within a single complex, sharing common facilities and optimising land use in a densely





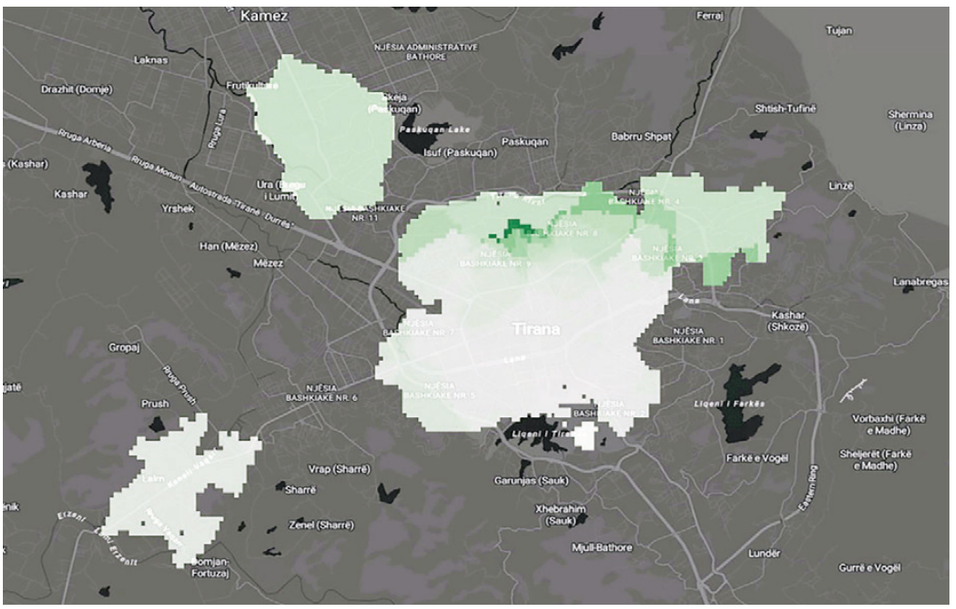


Fig. 19 | The increased area of coverage for primary schools is shown by the newly built schools, indicated by the red-coloured polygons. The rest of the map illustrates the existing coverage. The colour of the cells represents the height of buildings in the coverage area, with green cells representing low buildings and yellow cells representing higher buildings (credit: the Authors, 2026).

Fig. 20 | The increased area of coverage for secondary schools is shown by the newly built schools, indicated by the red-coloured polygons. The rest of the map illustrates the existing coverage. The colour of the cells represents the height of buildings in the coverage area, with green cells representing low buildings and yellow cells representing higher buildings (credit: the Authors, 2026).

Fig. 21 | Cells where there has been a material increase in primary school coverage by newly built schools. Green cells have higher coverage than white cells (credit: the Authors, 2026).

populated context. From an urban perspective, this choice is significant because it shows how the school can serve as a consolidator of services and an anchor capable of strengthening public provision in a district under strong settlement pressure. The configuration of internal courtyards creates a protected environment and establishes a calibrated relationship with the surrounding urban fabric, while the material durability and the volume's recognisability reinforce the public identity of the intervention (Figg. 13-15). This case study's quality is not solely determined by its size; the key aspect is that the building aims to embody the paper's thesis of the school as a civic infrastructure through architectural form. It functions not only as an educational space but as a hub for shared activities beyond school hours. A recurrent challenge for such complex structures is to maintain community openness over time without sacrificing security or rendering multifunctionality superficial or purely declarative.

International support for school reconstruction: the Emin Duraku School | The Emin Duraku School makes visible the opposite problem: not new urbanisation in dense areas, but the reconstruction of a historic facility within an already saturated urban fabric marked by progressive land occupation. The case clearly demonstrates the weight of spatial constraints affecting school infrastructure in Tirana. Originally built according to the standards of the socialist period, the school has over time seen part of its open space reduced due to informal constructions, later legalised, with significant effects on the availability of courtyards and on the quality of the relationship between the building and the neighbourhood (Fig. 16). After the 2019 Albania earthquake, the structural inadequacy of part of the complex required a radical reconstruction intervention.

Within the framework of the programme supported by the European Union and implemented by the United Nations Development Programme (2020) in Albania, the intervention made it possible to increase the built area, introduce new learning environments, and reorganise outdoor spaces within very strict site constraints (Figg. 17, 18). The strength of the intervention lies not only in seismic upgrading or dimensional expansion, but also in its ability to reinterpret a compromised site without renouncing the school's educational and civic qualities. This case, however, also highlights a structural criticality of Tirana's urban transformation: when public land has already been occupied or fragmented, the quality of the project must confront pre-existing conditions that are difficult to reverse. Reconstruction, however accurate, cannot on its own fully restore the lost open space. For this reason, Emin Duraku represents a scientifically relevant case: it shows that the rehabilitation of school buildings does not always coincide with a linear expansion of urban possibilities, but often measures the project's capacity to negotiate with historically accumulated constraints.

Municipal investment for the Servete Maçi School | The Servete Maçi School (Municipality of Tirana, 2017) represents the case in which direct municipal investment most clearly translates into the idea of school facilities as cultural and civic anchors at the neighbourhood scale. The replacement of the building with a new structure equipped

with laboratories, a library, a gymnasium, an auditorium, and student support spaces shows that a school can be endowed with a more articulated programme open to the collective life of the neighbourhood (Figg. 19-21). The value of the project lies not only in its technical or pedagogical upgrading, but also in the possibility of associating the educational function with a set of uses that reinforce the civic intensity of the building.

From this perspective, Servete Maçi convincingly interprets the school as an infrastructure of local welfare. The auditorium and shared spaces, if managed as accessible facilities, can extend the building's scope of action to the cultural and associative life of the neighbourhood, in line with the reflections on public facilities as infrastructures of urban welfare by Ricci, Poli, and Marino (2025). The transferability of the case is high, especially in contexts where the renewal of school buildings can be an opportunity to introduce collective services in neighbourhoods lacking them.

Cartographic reading and architectural-urban design: the core of the contribution's originality | The section dedicated to the construction of the cartographic apparatus constitutes the most original core of the paper, as it transforms cartography from a simple illustrative support into a critical tool capable of reformulating the design problem, in line with what is shown by Magliocco and Oneto (2023), for whom maps, grids, and spatial configurations are analytical devices useful for interrogating and verifying complex urban systems. Data on school locations, resident populations, pedestrian travel times, public transport stops, cycling infrastructure, and building density enable a multilevel analysis of school accessibility. The adopted procedure remains explicit and verifiable: it defines temporal thresholds, measures coverage, compares the existing situation with the increase generated by new facilities, and relates the school network to the geography of habitation.

The most innovative aspect is not the use of territorial data in itself, now widespread, but its use within a design-oriented perspective that integrates building, network, proximity, and public space. In many cases, school analysis remains confined to demography or asset management, whereas here the cartographic reading enters the field of architectural and urban design, as it allows for the assessment of where strengthening the network produces effective territorial rebalancing, where peripheral areas remain uncovered, and where the quality of access depends on pedestrian connections, public transport, or the availability of open spaces. Cartography also performs a critical function with respect to institutional narratives, as it makes it possible to relate environmental data, morphological structures, and infrastructural systems through comparable representations, as shown by Magliocco and Oneto (2023) in their combined use of grids, graphs, and tessellations to critically read different urban fabrics. Where public communication tends to emphasise the number of interventions, spatial analysis makes it possible to evaluate where and to what extent new buildings have expanded catchment areas, reduced distances, strengthened the most underserved neighbourhoods, or improved integration with other mobility infrastructures. It is precisely in this step that the present paper advances its disciplinary contribution: the quality of the school is not judged solely by the building itself, but also by its capacity to redistribute proximity and citizenship within urban space.

Barriers and critical issues of the approach | The idea of the school as an urban infrastructure encounters, in contexts such as Tirana but not only, a series of barriers that limit its full implementation. A first barrier is cultural and concerns the persistence of a representation of the school as a closed, monofunctional, and self-sufficient building. As long as school facilities are conceived exclusively as containers for classrooms, it becomes difficult to invest in the relationship with the ground, open space, safety of the routes, and openness to the community. A second barrier is of an economic and financial nature: the rapid construction of new schools can be supported by partnerships or extraordinary programs, but their effectiveness for urban welfare depends on routine maintenance, the management of shared facilities, and the continuity of public funding.

A third barrier is regulatory and institutional. In contexts marked by informal urbanisation, successive amnesties, difficulties in expropriation, and the fragmentation of responsibilities, the availability of land for new schools or the expansion of open spaces becomes uncertain. The case of Emin Duraku makes this evident: the quality of the project is measured in relation to the land-related and legal constraints accumulated over time. A fourth barrier is social and concerns actual accessibility: not all users experience proximity, safety, and route quality in the same way; differences in age, gender, economic condition, and mobility capacity can make a service appear accessible when, in reality, it is not.

Transferability and guidelines for process, project, product, and service | The experience of Tirana has a degree of transferability to other contexts, but only if the transferred elements are the operational conditions rather than the tangible outcomes. At the process level, the first condition is integration among urban planning, mobility policies, land management, and educational programming; without this condition, the school tends to be placed in a marginal position and lose the possibility of acting as a redistributive infrastructure. At the project level, it is necessary to consider the relationship between the building, access thresholds, open spaces, and the neighbourhood as an integral part of the architectural program, rather than a secondary issue. At the level of the architectural product, the cases discussed suggest that the contemporary school must be durable, with differentiated and 'open' functions, clearly recognisable as a public building, and capable of accommodating differentiated degrees of openness toward the community.

At the service level, finally, quality depends on the ability to keep the school active beyond teaching hours through management, maintenance, supervision, and rules of use. The disciplinary transferability of the contribution, moreover, extends beyond the sole field of school construction alone: the proposed reading may also concern other proximity infrastructures – libraries, sports facilities, socio-health services, civic centres – and highlights a general principle of contemporary urban design: the quality of a public service depends on its capacity to organise spatial relationships, accessibility, and collective use, rather than solely on the internal efficiency of the building.

Limits of the proposed perspective | The contribution presents limitations that must be clearly stated. The first limitation concerns the nature of the data used. The cartographic apparatus makes the interpretation more rigorous, but it remains dependent on the quality and consistency of the available data and information; moreover, the temporal accessibility thresholds necessary to conduct comparisons simplify mobility practices, which in reality are more complex and differentiated. The second limitation concerns the lack of a systematic post-occupancy evaluation of the case studies: the essay critically discusses the projects on the basis of their architectural framework, the institutional context, and the cartographic evidence, but it does not rely on an extensive campaign of direct observation of patterns of use over time.

A third limitation concerns the inevitably specific character of the Tirana case. The post-socialist urban history, the mechanisms of informal urbanisation, the weight of post-seismic reconstruction, and the administrative configuration of the Albanian capital constitute a specific framework, not entirely comparable to other contexts. The proposed transferability should therefore be understood as the transferability of principles and methods, not as the replication of identical institutional or typological arrangements.

Synergies and trade-offs with the 17 SDGs | Interpreted as an urban infrastructure, the school does not exhaust its contribution within SDG 4, but intersects with a broader set of SDGs whose effective activation nonetheless depends on precise conditions of location, accessibility, design, and management. The key point in this perspective is not to assert generically that adequate school infrastructure contributes to all SDGs, but to clarify under which conditions it can operate as a redistributive device, within a systemic and integrated approach in which the interconnections between objectives are decisive for the quality of urban space and for addressing territorial inequalities and access to proximate services.

It is above all in this regard that the case of Tirana shows its greatest relevance, directly engaging – beyond SDG 4 – SDGs 10 and 11: the school network does not function solely as an educational provision, but as a public infrastructure that reshapes relationships between neighbourhoods, access times, opportunities for use, and institutional presence in urban space, promoting accessibility, equity, and a sense of belonging to public space, in line with the idea analysed by Cellucci, Revellini, and Tatano (2025) that urban spaces must respond to the needs of the whole population through an inclusive paradigm.

From this main threshold, other possible effects radiate, which should not, however, be understood as automatic outcomes. The school can contribute to SDG 3 when it supports health, safety, physical activity, and active mobility; to SDG 5 when accessibility, inclusion, and use do not reproduce hierarchies of use or implicit barriers; to SDGs 6 and 7 when the building verifiably integrates strategies related to water, energy, and consumption reduction; to SDGs 12 and 13 when the

project considers durability, life cycle, adaptation, and resilience; to SDGs 16 and 17 when the intervention is supported by public governance capable of coordinating actors, resources, and responsibilities. In a more indirect form, and always mediated by context, the school project may also interact with SDGs 1, 2, 8, 9, 14, and 15, insofar as it reduces conditions of educational marginality, supports practices related to nutrition and care, activates construction and maintenance supply chains, guides technical innovation, and mitigates or exacerbates pressure on land, resources, and ecosystems.

Precisely because of this multiscalar nature, the relationship between the school and the SDGs must be interpreted in terms of trade-offs, including those between different demands. The expansion of territorial coverage can, for example, strengthen equity and proximity, but it can also translate into new land consumption if it is not accompanied by careful urban governance. Similarly, partnerships can accelerate implementation and expand intervention capacity, but they also tend to shift portions of constrained expenditure into the future, requiring the public sector to maintain strong capacities for control, monitoring, and the rebalancing of financial resources.

The concentration of functions in large-scale school complexes also entails evident trade-offs: on the one hand, it increases efficiency, facilities, and potential civic openness; on the other, it may reduce the widespread distribution of the service, weaken the relationship of proximity with the surrounding context, and prove less aligned with the daily rhythms of the neighbourhood. In the same way, opening the school to the community expands opportunities for use and the relational density of the infrastructure, but introduces significant requirements in terms of management, security, maintenance, and supervision, requiring the coordinated involvement of a multiplicity of actors and a public governance capable of guiding complex processes (Cellucci, Revellini and Tatano, 2025).

From this perspective, the school's contribution to the SDGs cannot be reduced to a linear sum of benefits; rather, it must be understood as the result of design and policy evaluations of objectives that are sometimes convergent and sometimes conflicting. The interest of the Tirana case lies precisely in this: it shows that the school can function as urban infrastructure with a high redistributive capacity only when the building project is embedded within a broader public rationale that integrates access, spatial quality, civic provision, environmental sustainability, and long-term governance. In the absence of such coordination, references to the SDGs risk remaining largely declaratory.

Concluding reflections | The case of Tirana makes it possible to formulate a thesis which, rather than closing the discussion, needs to be brought back to the centre of the disciplinary debate: the school constitutes one of the few public infrastructures in which the quality of the building design, the reduction of inequalities in the distribution of services, and the civic vocation of urban space are simultaneously legible; its relevance therefore far exceeds the perimeter of its architecture. Whenever a city builds, rebuilds, or relocates a school, it intervenes not only in a building or a functional provision but also in redefining distances, thresholds of access, travel times, settlement hierarchies, possibilities for collective use, and the concrete forms of public presence within neighbourhoods. In this sense, school infrastructure can be considered one of the devices through which the city distributes proximity, opportunities, and citizenship.

The most significant element emerging from the Tirana case, however, does not lie in the mere quantitative effectiveness of the implemented program, nor solely in the architectural quality of certain buildings, but in the possibility of reinterpreting the school network as a genuinely urban issue. It is in this shift of perspective that the essay situates its contribution: removing the school both from a reductive technical-administrative reading, centred on standards, costs, and execution times, and from a predominantly iconic narrative focused on the isolated value of the individual artefact, in order instead to bring it back within a design rationale that integrates building, network, accessibility, open space, and civic functions, which can translate, as shown by Setola and Borgianni (2025), into actual decision-support tools for public administrations and designers. From this point of view, the school appears as a particularly demanding testing ground for verifying the capacity of architecture and urban planning to produce measurable redistributive effects in urban space.

The cases considered indeed show that the quality of the contemporary school does not coincide with either the adoption of a specific architectural language or a single procedural or financial model. Rather, it depends on the ability to transform the building into an active node within a territorial network, to construct legible and accessible relationships with public space, to guarantee effective and differentiated proximity to services, and to make possible a civic use of the infrastructure beyond strictly school hours. In this perspective, the school is all the more relevant the more it succeeds in operating as a redistributive infrastructure, that is, as a device capable of reducing territorial imbalances, mitigating settlement marginality, and strengthening the presence of public goods within the ordinary contexts of urban life.

At the same time, the Tirana case invites us to avoid celebratory readings. Its transferability to other contexts does not depend on the formal reproduction of visible outcomes, but on the capacity to recognise the operational conditions that made its implementation possible: continuity of public governance, centrality of the settlement issue, integration between urban decision-making and architectural design, availability of adequate implementation tools, the capacity of public administrative control, and a clear acknowledgment of the public value of the school beyond the sole provision of educational services.

In this sense, it is useful to recall, on the one hand, the study by Setola and Borgianni (2025), according to which methodology becomes replicable precisely when it adopts the neighbourhood as a unit of work and constructs transferable devices even in different urban contexts; and, on the other hand, the study by Ferrante, Romagnoli, and Villani (2023), which shows how the organisation and communication of data, the reading of enabling factors, and the structuring of sheets and databases can support evidence-based planning and make best practices more transferable across different contexts. When these conditions are lacking, the risk is twofold: on the one hand, the school may return to being treated as an educational facility, to be located according to marginal logics within the urban structure; on the other hand, the appeal to innovation may result in only apparent progress, incapable of affecting the deeper structures of urban inequality.

It is precisely on this ground that the essay opens a further line of research, directly concerning both design and public policies. Studies are needed that are capable of integrating morphological analyses, post-occupancy evaluations, observation of patterns of use, precise measurements of accessibility differentiated by age, gender, and social condition, as well as assessments of the capacity of schools to function as proximity welfare outposts, instruments of urban health, and agents of climate adaptation. Similarly, on the methodological level, it appears increasingly necessary to construct evaluation frameworks capable of jointly addressing building performance, urban role, civic openness, management sustainability, and redistributive impact, overcoming the traditional separation between technical indicators, pedagogical criteria, and urban planning parameters; from this point of view, the study by Setola and Borgianni (2025) is particularly relevant, as it shows how design scenarios, technical guidelines, and meta-design sheets can be articulated as operational tools to jointly interpret urban quality, health, and proximity-based-well-being.

For the scientific community, the interest of the Tirana case therefore lies not only in offering a repertoire of best practices, but in proposing a different interpretative key: to adopt the school as a privileged observatory for understanding how cities construct or undermine spatial equity through design. In this sense, the school issue does not belong solely to the field of sectoral construction, but directly concerns the way in which public responsibility in design, the redistributive capacity of institutions, and the democratic quality of urban space are configured. If approached with this awareness, the school can return to being not a separate specialist theme, but one of the decisive arenas in which architecture, urban planning, and public policies measure their capacity to build more equitable, accessible, proximaty-based, and durable cities.

Acknowledgements

The study acknowledges the Municipality of Tirana and Drejtoria e Punëtorëve Numër 3 (DPN3) for providing access to the school data used in the cartographic analysis.

Notes

1) For more information, see the webpage: planifikimi.gov.al/index.php?id=pins_durana [Accessed 28 March 2026].

2) According to national statistical data, Tirana's population increased significantly after the early 1990s, rising from approximately 250,000 inhabitants to more than 600,000 within the municipal boundaries, while the wider metropolitan area approaches one million residents (INSTAT, 2023).

3) The General Local Plan of Tirana was developed in collaboration with Stefano Boeri Architetti.

4) For more information, see the webpage: urban95academy.org/ [Accessed 28 March 2026].

5) The redevelopment of Skanderbeg Square, designed by 51N4E in collaboration with Albanian architects and the Municipality of Tirana (2018), received international recognition including the European Prize for Urban Public Space.

6) The Pyramid of Tirana, built in 1988, was originally conceived as a museum and mausoleum dedicated to the former communist leader Enver Hoxha, although the mausoleum function was never realised. The building later served various cultural and exhibition purposes before its recent transformation into the TUMO Center for Creative Technologies.

7) The International Donors' Conference 'Together for Albania' was held in Brussels on 17 February 2020 under the coordination of the European Commission, mobilising financial commitments from international institutions, governments and development agencies to support the reconstruction process following the 26 November 2019 earthquake.

References

Aliaj, B. and Haxhiu, L. (2025), *Urban Change Detection in Tirana, Albania (2000-2025) – Using Remote Sensing and Open Geospatial Data*. [Online] Available at: isprs-archives.copernicus.org/articles/XLVIII-4-W13-2025/143/2025/isprs-archives-XLVIII-4-W13-2025-143-2025.pdf [Accessed 28 March 2026].

Amin, A. (2014), "Lively Infrastructure", in *Theory, Culture & Society*, vol. 31, issue 7-8, pp. 137-161. [Online] Available at: doi.org/10.1177/0263276414548490 [Accessed 28 March 2026].

Bateman, J. (2019), "They built it themselves' – How a slum became Albania's fastest growing city", in *The Guardian*, newspaper online, 19/11/2019. [Online] Available at: theguardian.com/cities/2019/nov/19/everything-made-people-inside-former-slum-albania-fastest-growing-city-kamza [Accessed 28 March 2026].

Beck, K. and Kaune, M. (2025), "Early Childhood Development and Cities", in *LSE Cities*, Urban95 Academy Working Paper. [Online] Available at: lse.ac.uk/Cities/Assets/Documents/Working-Papers/Beck-and-Kaune-2025-Early-Childhood-Development-and-Cities.pdf [Accessed 28 March 2026].

Boeri, S. (2016), *Tirana 2030 – General Local Plan*, Municipality of Tirana, Tirana. [Online] Available at: planifikimi.gov.al/index.php?eID=dumpFile&t=f&f=1730&token=e25abaef3f11df543632f27ab83f8f700979065e [Accessed 28 March 2026].

Cangelli, E. (2025), "Rigenerazione urbana e SDG – Approcci progettuali per la riduzione delle disuguaglianze urbane | Urban regeneration and SDGs – Design approaches for reducing urban inequalities", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 17, pp. 28-41. [Online] Available at: doi.org/10.69143/2464-9309/1712025 [Accessed 28 March 2026].

Cellucci, C., Revellini, R. and Tatano, V. (2025), "Quale genere di città – Rigenerazione urbana tra intersezionalità e inclusione | What kind of city – Urban regeneration between intersectionality and inclusion", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 17, pp. 108-119. [Online] Available at: doi.org/10.69143/2464-9309/1762025 [Accessed 8 April 2026].

Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (2024), *Improving public transport in Tirana, one step at a time*, Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit, Tirana. [Online] Available at: transformative-mobility.org/multimedia/improving-public-transport-in-tirana-one-step-at-a-time/ [Accessed 28 March 2026].

Ferrante, T., Romagnoli, F. and Villani, T. (2023), "Sviluppo urbano sostenibile – Organizzazione di contenuti informativi per la transizione verso i Distretti a Energia Positiva | Sustainable urban development – Organizing information content for the transition to Positive Energy Districts", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 13, pp. 191-204. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/13162023 [Accessed 8 April 2026].

Fiorini, L., Saganeiti, L., Perazzini, M., Bontempo, D., Bucci, M., Giancola, M. and Perilli, E. (2025), "L'impatto dei modelli urbani sul supporto sociale – Tra giustizia spaziale e sviluppo sostenibile | The impact of urban models on social support – Between spatial justice and sustainable development", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 17, pp. 196-207. [Online] Available at: doi.org/10.69143/2464-9309/17132025 [Accessed 28 March 2026].

Gehl, J. (2010), *Cities for People*, Island Press, Washington (DC).

Gehl, J. (2011), *Life Between Buildings – Using Public Space*, Island Press, Washington (DC). [Online] Available at: cus.ubt-uni.net/wp-content/uploads/2024/11/Jan-Gehl-Life-Between-Buildings_-Using-Public-Space-2011-Island-Press.pdf [Accessed 28 March 2026].

Gehl, J. and Svarre, B. (2013), *How to Study Public Life*, Island Press, Washington (DC).

Graham, S. and Marvin, S. (2001), *Splintering Urbanism – Networked Infrastructures, Technological Mobilities and the Urban Condition*, Routledge, London.

INSTAT (2024), *Regional Statistical Yearbook 2024 – Prefectures and Municipalities*. [Online] Available at: instat.gov.al/media/vurntwyn/regional-statistical-yearbook-2024-fin.pdf [Accessed 28 March 2026].

INSTAT (2023), *Censi i Popullsise dhe Banesave në shqipëri 2023 – Rezultatet Kryesore | Albania Population and Housing 2023 – Main Results*, Institute of Statistics, Tirana. [Online] Available at: instat.gov.al/media/14303/cens-2023.pdf [Accessed 28 March 2026].

Jacobs, J. (1961), *The Death and Life of Great American Cities*, Random House, New York.

Karsten, L. and Van Vliet, W. (2006), "Increasing Children's Freedom of Movement – Introduction", in *Children, Youth and Environments*, vol. 16, issue 1, pp. 69-73. [Online] Available at: jstor.org/stable/10.7721/chilyoutenvi.16.1.0069 [Accessed 28 March 2026].

Kuris, G. (2019), *Reconstructing a City in the Interests of its Children – Tirana, Albania, 2015-2019*, Institute for Social and Policy Studies, Princeton University. [Online] Available at: successfulsocieties.princeton.edu/sites/g/files/toruqf5601/files/Albania_Tirana_Children_FINAL_4_28_23.pdf [Accessed 28 March 2026].

Lefebvre, H. (1991), *The Production of Space*, Blackwell Publishing, Oxford.

Lydon, M. and Garcia, A. (2015), *Tactical Urbanism – Short-Term Action for Long-Term Change*, Island Press, Washington (DC). [Online] Available at: doi.org/10.5822/978-1-61091-567-0 [Accessed 28 March 2026].

Magliocco, A. and Oneto, G. (2023), "Configurazioni spaziali nell'analisi ambientale urbana – Il contributo dell'isola di calore | Spatial configurations in urban environmental analysis – The role of the heat island effect", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 14, pp. 216-223. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/14182023 [Accessed 8 April 2026].

Ministry of Education and Sports (2015), *Normat dhe Standardet për Projektimin e Shkollave në Arsimin Parauniversitar*, Tirana.

Moreno, C., Chabaud, D., Gall, C. and Pratlong, F. (2021), "Introducing the '15-Minute City' – Sustainability, Resilience and Place Identity in Future Post-Pandemic Cities", in *Smart Cities*, vol. 4, issue 1, pp. 93-111. [Online] Available at: doi.org/10.3390/smartcities4010006 [Accessed 28 March 2026].

Municipality of Tirana (2018), *Studimi i Fizibilitetit për Përmirësimin e Infrastrukturës Arsimore*, Municipality of Tirana, Tirana.

Municipality of Tirana (2017), *Ndërtimi i ri i shkollës 9-vjeçare 'Servete Maçi'*, Municipality of Tirana.

Ricci, L., Poli, I. and Marino, M. (2025), "Welfare urbano e rigenerazione – Sostenibilità e inclusione sociale per il raggiungimento degli SDG | Urban welfare and regeneration – Sustainability and social inclusion for achieving the SDGs", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 17, pp. 94-107. [Online] Available at: doi.org/10.69143/2464-9309/1752025 [Accessed 28 March 2026].

Rossi, A. (1982), *The Architecture of the City*, MIT Press, Cambridge.

Rowe, C. and Koetter, F. (1978), *Collage City*, MIT Press, Cambridge.

Secchi, B. (2013), *La città dei ricchi e la città dei poveri*, Laterza, Roma.

Setola, N. and Borgianni, S. (2025), "Promuovere salute e benessere – Strumenti per il progetto di Case della Comunità e quartieri sani | Promoting health and well-being – Tools for designing community health centres and healthy neighbourhoods", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 17, pp. 226-241. [Online] Available at: doi.org/10.69143/2464-9309/17152025 [Accessed 7 April 2026].

Talen, E. (2019), *Neighborhood*, Oxford University Press, New York.

Talen, E. and Koschinsky, J. (2013), "The Walkable Neighborhood – A Literature Review", in *International Journal of Sustainable Land Use and Urban Planning*, vol. 1, issue 1, pp. 42-63. [Online] Available at: academia.edu/53554476/The_walkable_neighborhood_a_literature_review [Accessed 28 March 2026].

UN – United Nations (2015), *Transforming our World – The 2030 Agenda for Sustainable Development*. [Online] Available at: sdgs.un.org/2030agenda [Accessed 31 March 2026].

UNDP Albania (2020), *EU4Schools Programme*, United Nations Development Programme Albania. [Online] Available at: undp.org/albania/projects/eu4schools [Accessed 28 March 2026].

Vale, L. J. and Campanella, T. J. (eds) (2005), *The Resilient City – How Modern Cities Recover from Disaster*, Oxford University Press, New York.

Valente, R., Mozingo, L. A., Bosco, R. and Giacobbe, S. (2024), "Gestione integrata delle risorse naturali in contesti urbani sostenibili | Integrated natural resource management in sustainable urban context", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 15, pp. 180-189. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/15142024 [Accessed 7 April 2026].

World Bank Group (2007), *Albania Urban Sector Review – Report No. 37277-AL*. [Online] Available at: documents1.worldbank.org/curated/en/125501467992047283/pdf/372770ENGLISH01iew1P09932501PUBLIC1.pdf#:~:text=area,is%20estimated%20to%20exceed%20one [Accessed 28 March 2026].

ARCHITECTURE
Essays & Viewpoint

AGATHÓN – International Journal of Architecture, Art and Design | n. 19 | 2026 | pp. 68-81
ISSN print: 2464-9309 – ISSN online: 2532-683X | doi.org/10.69143/2464-9309/1942026

Article Info

Received	12 March 2026
Revised	21 April 2026
Accepted	24 April 2026
Published	30 June 2026

ADATTABILITÀ E INCLUSIONE
Strategie contro le disuguaglianze nell'ambiente costruito

ADAPTABILITY AND INCLUSION
Strategies to reduce inequality in the built environment

Maria Luisa Germanà, Giorgia Madonia

Abstract

Nel dibattito contemporaneo la produzione e la trasformazione dell'ambiente costruito sono lette come esito dell'intreccio tra dimensioni materiali e immateriali che al tempo stesso riflettono e influenzano le strutture sociali. In questa prospettiva le disuguaglianze spaziali possono essere interpretate come manifestazioni di processi economici, sociali e culturali più ampi. Il contributo analizza il ruolo della Progettazione Tecnologica e Ambientale dell'Architettura nel contrasto a tali disuguaglianze, soffermandosi sul rapporto inscindibile tra inclusività e adattabilità. Attraverso una riflessione teorica e l'analisi comparativa di tre casi di edilizia residenziale sociale, il saggio interpreta l'adattabilità come un dispositivo multilivello che coinvolge sistemi edilizi, pratiche d'uso e modelli di governance, contribuendo alla costruzione di ambienti più inclusivi e resilienti.

In contemporary debate, the creation and transformation of the built environment are seen as the result of the interplay between material and immaterial dimensions, which both reflect and influence social structures. From this perspective, spatial inequalities can be interpreted as manifestations of broader economic, social, and cultural processes. This paper analyses the role of Technological and Environmental Design of Architecture in countering such inequalities, focusing on the inseparable relationship between inclusivity and adaptability. Through theoretical reflection and a comparative analysis of three cases of social housing, the essay interprets adaptability as a multi-level mechanism involving building systems, usage practices, and governance models, contributing to the creation of more inclusive and resilient environments.

Keywords

progettazione tecnologica dell'architettura, adattabilità, disuguaglianze, inclusione, edilizia residenziale sociale

technological design of architecture, adaptability, inequalities, inclusion, social housing



Maria Luisa Germanà, Architect and PhD in Building and Environmental Refurbishment, is a Full Professor at the University of Palermo (Italy). Her work focuses primarily on interventions in the built environment, with a particular emphasis on public buildings and the application of the bioclimatic approach. She serves as scientific director for national and international research projects and agreements, and is an expert member of ICOMOS committees. E-mail: marialuisa.germana@unipa.it

Giorgia Madonia, Architect and PhD Candidate in Architecture, Arts and Planning at the University of Palermo (Italy), conducts research into design strategies based on the principle of adaptability, adopting a process-oriented approach focused on the gradual transformation of spaces and their ability to respond over time to constantly evolving needs in terms of use and management. E-mail: giorgia.madonia01@unipa.it

Negli ultimi decenni del secolo scorso si è consolidata la consapevolezza che qualunque processo produttivo è strettamente connesso al contesto in cui si sviluppa. Su questo profondo legame, che si manifesta tanto negli aspetti materiali del prodotto quanto nelle componenti sociali e culturali dei processi, è maturata una visione integrata della tecnologia. Superando un'interpretazione positivista, si è progressivamente affermata la tensione verso una maggiore integrazione tra la sfera degli esperti e quella dei fruitori, a partire dalla riconsiderazione delle circostanze tecniche, organizzative e culturali entro cui si svolge ogni pratica tecnologica (Pacey, 1983).

Oggi è assodato che la tecnologia non si esaurisce nella più o meno complessa trasformazione fisica della materia in artefatto, poiché ha assunto uno spessore etico che investe molteplici aspetti della vita individuale e collettiva (Germanà, 2024). In questo quadro ha assunto crescente rilievo una componente sociologica riconoscibile nella produzione degli artefatti, come dimostra l'approccio SCOT (Social Construction of Technology) che ha evidenziato gli effetti dei condizionamenti esercitati dai gruppi sociali nell'affrontare i problemi connessi alla produzione tecnologica (Pinch and Bijker, 1984; Collins and Pinch, 2009).

Se si guarda all'ambiente costruito come all'insieme degli artefatti derivanti dalle attività costruttive, indipendentemente dalla scala di osservazione, dalla destinazione d'uso, dai valori e dai significati loro attribuiti, la visione integrata degli aspetti materiali e immateriali, applicabile a qualunque prodotto tecnologico, assume un livello di complessità assai più elevato, soggetto a continue variazioni prodotte da fattori intenzionali o causali (Di Battista, 2006): da un lato il legame con il contesto si radica ancora più profondamente in specifiche condizioni ambientali, comprese quelle microclimatiche, dall'altro il contesto antropico si infittisce di una rete di relazioni dinamiche, attraversate da rilevanti interessi economici, condizionamenti culturali e strutture sociali. Proprio nell'intreccio tra aspetti materiali e immateriali, attraverso cui l'ambiente costruito conferisce forma fisica alla società, prendono corpo molte delle disuguaglianze che emergono nei contesti urbani.

Alla luce di queste premesse il presente contributo interpreta l'adattabilità (Schmidt III et alii, 2010) non come mera proprietà tecnica ma come categoria integrata ricca di sfaccettature, verificata comparativamente in tre casi con differenti regimi di trasformazione, in grado di contrastare la produzione e la riproduzione delle disuguaglianze nell'ambiente costruito. Il testo si articola in tre parti: la prima sezione inquadra il rapporto tra ambiente costruito e disuguaglianze sociali, la seconda approfondisce il paradigma dell'adattabilità, mentre la terza analizza tre casi studio attraverso le chiavi interpretative del sistema edilizio, del sistema d'uso e del sistema di governance.

Il lavoro si rivolge alla comunità scientifica della Progettazione Tecnologica e Ambientale dell'Architettura e presenta gli esiti parziali di una ricerca in corso, orientata a indagare strategie progettuali basate sui principi di adattabilità e reversibilità, attraverso un approccio incentrato sulla trasformazione progressiva dell'ambiente costruito e sulla sua capacità di rispondere nel tempo alle mutevoli esigenze di utilizzo e gestione. Il presente contributo si colloca all'interno di tale percorso di ricerca, che intende sviluppare un dispositivo di valutazione multicriterio applicabile, con opportuni adattamenti, a contesti e scale differenti, contribuendo a colmare la frammentazione esistente tra approcci disciplinari e a orientare la comunità scientifica verso una comprensione più sistemica e processuale del progetto tecnologico e ambientale dell'architettura.

Ambiente costruito come fenomeno sociale: disuguaglianze tra dimensione tangibile e intangibile | La relazione di reciprocità tra insediamenti umani e strutture sociali si evidenzia nella conformazione dell'ambiente costruito, definibile come manifestazione tangibile della società (Lee, 1976), che al tempo stesso la condiziona e ne è condizionata. È noto, ad esempio, che insediamenti caratterizzati da un tessuto viario compatto e dalla compresenza di attività differenti agevolano sensibilmente le relazioni sociali rispetto a quartieri dormitorio a bassa densità edilizia (Mouratidis, 2018); un esempio di come invece la società possa incidere sull'ambiente costruito è il ruolo svolto dalle 'host communities' nei processi di conservazione del Patrimonio costruito (Xu, Tang and Zhang, 2024).

Il tema delle disuguaglianze va inquadrato nel reciproco condizionamento tra ambiente costruito e società, sia per comprenderlo appieno sia per individuare possibili modalità di intervento. Le differenziazioni riscontrabili nell'ambiente costruito, a scala regionale o urbana, possono assumere una valenza positiva quando esprimono un valore identitario e contrastano l'appiattimento globale dei 'non luoghi'. Quando invece tali differenze riflettono posizioni gerarchiche e di privilegio che incidono negativamente sulla vita delle persone, esse si configurano come 'disuguaglianze spaziali e urbane' indesiderabili (Storper, 2024).

Le disuguaglianze sociali che si riflettono sull'ambiente costruito possono derivare da circostanze intangibili o tangibili. Quando derivano da condizioni immateriali le loro cause si riconducono soprattutto al crescente squilibrio nella distribuzione delle ricchezze e dei redditi. Si tratta di disuguaglianze ormai radicate e difficilmente eludibili, prodotte da scelte politico-economiche che, nel corso della storia, hanno sistematicamente privilegiato minoranze élitarie, assumendo nel tempo un'estensione e una complessità sempre maggiori, con circostanziate conseguenze riscontrabili in numerosi casi specifici (Bellini and Martorana, 2025).

Proprio sulla dimensione finanziaria insiste l'Agenda 2030 (UN, 2015) con l'SDG 10, dedicato alla riduzione delle disuguaglianze all'interno dei Paesi e tra Paesi, come mostrano i relativi indicatori. Tuttavia oggi è maturata la consapevolezza che le disuguaglianze economiche si intrecciano con quelle ambientali e politiche, amplificando gli effetti dei divari reddituali e producendo ricadute in altri ambiti: conflitti sociali, instabilità politica e ingiustizie nell'esposizione agli effetti negativi dei cambiamenti climatici. Per tale motivo, alle azioni direttamente orientate agli aspetti finanziari, come il regime di tassazione, appare indispensabile affiancare azioni indirette quali «[…] investment in human capabilities, climate accountability tied to private capital ownership, and inclusive political institutions capable of rebuilding trust and solidarity» (Chancel et alii, 2026, p. 11).

Tra le azioni indirette di contrasto alle disuguaglianze rientrano quelle che in vario modo intervengono sulle loro manifestazioni nell'ambiente costruito (Ricci, Poli and Marino, 2025; Cangelli, 2025), pur nella consapevolezza che esse continueranno a essere presenti entro un orizzonte realistico del presente e del futuro. In questa prospettiva le disuguaglianze concorrono alla formazione del fenomeno della marginalità che richiede un approccio multilivello (Oppido, Ragozino and Esposito De Vita, 2023) e multidimensionale (Varghese and Kumar, 2022). Poiché si tratta di un fenomeno cumulativo le trasformazioni dell'ambiente, costruito e non costruito, attraverso miglioramenti materiali e tecnici, impiego di energia e mobilitazione di capitale umano, possono contribuire a modificare la condizione di marginalità, reale o percepita (Pulighe et alii, 2019).

Dunque, se le disuguaglianze di origine intangibile sono difficilmente intaccabili in sé, si può ipotizzare di contrastarle attraverso le loro ripercussioni fisiche sull'ambiente costruito. I contesti più favorevoli alla sperimentazione di una simile ipotesi sono le città, luoghi in cui la prossimità tra gruppi sociali differenti, la maggiore evidenza del bene comune e i più ampi margini di redistribuzione delle risorse consentono di sperimentare nuove strategie, a condizione che vi sia una 'governance quotidiana e inclusiva' (Vitale, 2024).

Per produrre risultati concreti le strategie di riequilibrio delle disuguaglianze devono essere contestualizzate «[…] perché per riequilibrare le disuguaglianze, il punto non è solo cosa fare o come ridistribuire verso i meno abbienti, ma decidere dove investire, dove localizzare le infrastrutture e le opportunità di lavoro, quali luoghi necessitano di un'accessibilità inclusiva e di una migliore mobilità» (Vitale, 2024, p. 15). Inoltre è necessario che tali strategie siano in grado di durare nel lungo periodo, poiché «[…] un appello a favore di accordi e piani istituzionali flessibili e adattivi non può diventare una scusa intellettuale reazionaria per un'attuazione discontinua e inefficace» (Vitale, 2024, p. 16). Pur essendo lontane le cause, gli effetti delle disuguaglianze in termini di costi sociali sono molto prossimi e potenzialmente esplosivi. Per questo i governi locali sono chiamati in causa in misura crescente e si auspica che la città sia considerata «[...] un luogo di apprendimento continuo, in cui una delle risorse chiave è la co-produzione di conoscenza pubblica, e la critica e la partecipazione sono leve democratiche essenziali per governare il cambiamento» (Vitale, 2024, p. 17).

Progettazione Tecnologica e Ambientale dell'Architettura e disuguaglianze nell'ambiente costruito | All'interno del quadro generale sopra delineato le disuguaglianze riconducibili a cause tangibili rientrano abitualmente nel campo operativo della Progettazione Tecnologica dell'Architettura. Esse sono collegate a caratteristiche fisiche, quali dislivelli, limiti dimensionali o conformazioni superficiali, presenti nella generalità dell'ambiente costruito e potenzialmente in grado di ostacolare la piena espressione dell'esistenza umana, con ricadute su individui, famiglie, comunità e società nel loro insieme (Lauria, 2017). Tali impedimenti producono disuguaglianze nella fruizione degli ambienti di vita, aperti e chiusi, incidendo sul livello di accessibilità e riguardando potenzialmente qualunque categoria sociale, indipendentemente dalla condizione economica, dall'età o dal genere. Restando nel campo del tangibile diverso è il caso delle limitazioni



Fig. 1 | Quinta Monroy residential building in Iquique, the half-house structure provided to residents (2004), designed by Alejandro Aravena (source: dezeen.com, 2026).

alla fruizione che non derivano dalle caratteristiche dell'ambiente costruito, ma vengono introdotte intenzionalmente per allontanare determinate categorie di persone considerate marginali e sgradite, in quanto estranee ai canoni sociali dominanti (Nielsen, 2024). Design for All e Hostile Architecture rappresentano due orientamenti della progettazione tecnologica che si distinguono per il modo in cui definiscono gli obiettivi rispetto alle limitazioni d'uso: il primo tende a eliminarle per rimuovere le disuguaglianze; la seconda le introduce deliberatamente, confermandole e rafforzandole. Ciò evidenzia l'opportunità di abbandonare la consolatoria presunzione di neutralità della progettazione tecnologica, riconoscendone l'imprescindibile dimensione etica.

Per quanto riguarda le disuguaglianze di origine intangibile, il contributo della Progettazione Tecnologica e Ambientale deve misurarsi con un fenomeno fluido e in continua trasformazione, come mostra la genesi della marginalizzazione, i cui fattori causali possono essere transitori o permanenti, agire improvvisamente, come nel caso delle calamità naturali, oppure progressivamente, come nei processi innescati dall'abbandono. Le principali radici delle disuguaglianze sociali risiedono nelle ricchezze e nei redditi, i cui andamenti fluttuano, impoverendo fasce sociali non tradizionalmente considerate vulnerabili, ma che possono diventarlo nell'arco di una sola generazione. Inoltre è prevedibile che la crescente penuria di risorse e il ripetersi di condizioni emergenziali contribuiscano a diffondere e a esasperare le disuguaglianze sociali.

Per questo motivo la Progettazione Tecnologica fa leva su un aspetto teorico e metodologico che la contraddistingue: la capacità disciplinare di includere la variabile tempo nei processi di formazione e trasformazione dell'ambiente costruito, cercando la mediazione, anziché la contrapposizione, tra i poli della permanenza e della temporaneità (Germanà, 2018).

Nel paradigma oggi dominante la visione circolare del tempo ha sostituito quella lineare, allontanando l'utopia di una durata illimitata e di una temporaneità fuori controllo, entrambe incoerenti con il principio di sostenibilità: gli estremi della produzione, dall'approvvigionamento delle materie prime alla produzione di scarti e rifiuti, tendono a sovrapporsi; le fasi dei processi risultano sempre più intrecciate e l'interoperabilità facilita le interazioni tra attori diversi. In modo analogo il paradigma contemporaneo affianca allo scorrere del tempo cronologico, quantificabile e inesorabile, il 'tempo cairotico': un tempo qualitativo, concentrato su un momento definito che diventa occasione o opportunità, rispetto al quale le azioni umane assumono un valore etico (Germanà, 2025).

La visione cairotica del tempo può indurre a rinunciare a soluzioni definitive, ritenute valide per tutti e per sempre, per cogliere, anche quando le disuguaglianze sono già presenti o possono manifestarsi, l'opportunità di orientare le scelte progettuali verso «[…] valori come dignità, autonomia, riparabilità, manutenzione e condivisione. Progettare con e nella povertà vuole dire accettare il vincolo, esplorare il limite, restituire senso a ciò che è fragile […]: significa riscrivere una grammatica del necessario, che metta al centro non la forma, ma la relazione» (Valenti et alii, 2025, pp. 55, 56). Le relazioni con cui si confronta una simile 'grammatica del necessario' sono mutevoli nel tempo; per questo, agli indicatori della cura, della partecipazione, della modularità e della riparabilità occorre affiancare anche quello dell'adattabilità.

Inclusività e adattabilità come condizioni reciprocamente costitutive dell'equità spaziale | In un contesto segnato da crescente instabilità sociale, economica e ambientale la Progettazione Tecnologica e Ambientale dell'Architettura è chiamata a confrontarsi con la mutabilità delle circostanze materiali e immateriali che, nell'ambiente costruito, generano nuove condizioni di esposizione alla vulnerabilità (Pathiraja, 2025).

L'imprevedibilità dei bisogni, scontrandosi con la tradizionale inerzia al cambiamento propria dell'ambiente costruito, contribuisce infatti alla produzione e alla riproduzione delle disuguaglianze spaziali (Candeloro et alii, 2025); se tali disuguaglianze assumono forme dinamiche e cumulative anche le risposte progettuali devono poter evolvere, evitando configurazioni spaziali rigide che rischiano di cri-

stallizzare condizioni di esclusione o di generarne di nuove nel tempo. In questa prospettiva l'adattabilità emerge come qualità strategica del progetto architettonico e tecnologico (Heidrich et alii, 2017) poiché consente la trasformazione degli spazi nel tempo, in relazione al mutare delle disuguaglianze spaziali, e garantisce continuità di accesso, uso e appropriazione.

In questo senso strategie quali la riconfigurabilità spaziale, la flessibilità funzionale e l'indeterminatezza d'uso (Schneider and Till, 2007) possono essere lette come manifestazioni operative di un paradigma progettuale in cui inclusività e adattabilità coincidono (Calcagnini, 2023). Tale interpretazione si fonda sulla definizione di 'progetto flessibile' (Baratta, Conti and Tatano, 2024), che intende la flessibilità come tattica dell'agire progettuale orientata a implementare la resilienza del sistema utente-spazio-dotazioni, facendo riferimento a un grado di modificabilità attiva e consapevole.

L'idea di adattabilità in architettura deriva in larga misura dalla teoria dell''open building', sviluppata negli anni Sessanta del Novecento in risposta alle difficoltà poste dalla forte domanda di alloggi nel secondo dopoguerra. Nel volume 'Supports – An Alternative to Mass Housing' l'architetto N. John Habraken (1972) introduce un modello progettuale che distingue chiaramente due sistemi dell'edificio: la struttura principale, il 'base building', definita dal promotore o dall'investitore, e gli elementi interni di completamento, il 'fill-out', che possono essere organizzati e trasformati dagli abitanti secondo le proprie esigenze.

In questo senso l'adattabilità e l'inclusività possono essere interpretate come condizioni reciprocamente costitutive: mentre la prima orienta il progetto verso il riconoscimento della pluralità dei soggetti e delle pratiche d'uso (Germanà, 2021), la seconda fornisce gli strumenti spaziali e tecnologici necessari per accogliere tale pluralità nel tempo (Tsoka and Tsikaloudaki, 2025). Considerata in questi termini l'adattabilità non può essere ridotta a una semplice proprietà tecnica dell'architettura ma va intesa come un dispositivo complesso (van Ellen et alii, 2021) che coinvolge simultaneamente configurazioni spaziali, pratiche abitative e modelli di gestione.

È opportuno precisare che il rapporto tra adattabilità e inclusività può riferirsi all'intero sistema dell'ambiente costruito, inteso come fenomeno sociale, e non soltanto alla scala edilizia. Approcci progettuali orientati alla trasformazione progressiva degli spazi nel tempo, anche attraverso il coinvolgimento degli utenti nei processi di appropriazione e d'uso, possono essere sperimentati a diverse scale dell'ambiente costruito (Sgobbo and Moccia, 2016), contribuendo a configurare contesti più aperti alla pluralità delle condizioni sociali e meno esposti alla produzione e alla riproduzione di disuguaglianze spaziali.



Fig. 2 | Quinta Monroy residential building in Iquique, the 2,500 half-houses built by 2016 (2004), designed by Alejandro Aravena (source: dezeen.com, 2026).



Fig. 3 | Quinta Monroy residential building in Iquique, the half-house structure completed by the residents (2004), designed by Alejandro Aravena (source: dezeen.com, 2026).

In particolare l'edilizia residenziale sociale, rivolta a una quota di popolazione caratterizzata da condizioni economiche eterogenee e mutevoli nel tempo, è sempre più interpretata come un processo dinamico piuttosto che come una condizione statica (Battaino, Fossati and Marconi, 2025): in questa prospettiva la casa si configura come un osservatorio privilegiato per analizzare le relazioni tra la configurazione dell'ambiente costruito e le dinamiche di disuguaglianza.

Approccio metodologico | Lo studio si fonda su un modello interpretativo dell'adattabilità, sviluppato a partire dalla letteratura di riferimento e articolato nelle tre dimensioni del sistema edilizio, del sistema d'uso e del sistema di governance, intese come chiavi di lettura interrelate attraverso cui osservare le modalità con cui i progetti rispondono a condizioni sociali ed economiche mutevoli. Il sistema edilizio riguarda le scelte tecnologiche e distributive che consentono la trasformazione degli spazi; il sistema d'uso si riferisce alle pratiche abitative e alle modalità di appropriazione degli ambienti da parte degli utenti; il sistema di governance riguarda il coinvolgimento degli abitanti nei processi decisionali e nelle forme di gestione dell'edificio. In questa prospettiva l'adattabilità si configura come una proprietà, esistente o di progetto, da analizzare a più livelli.

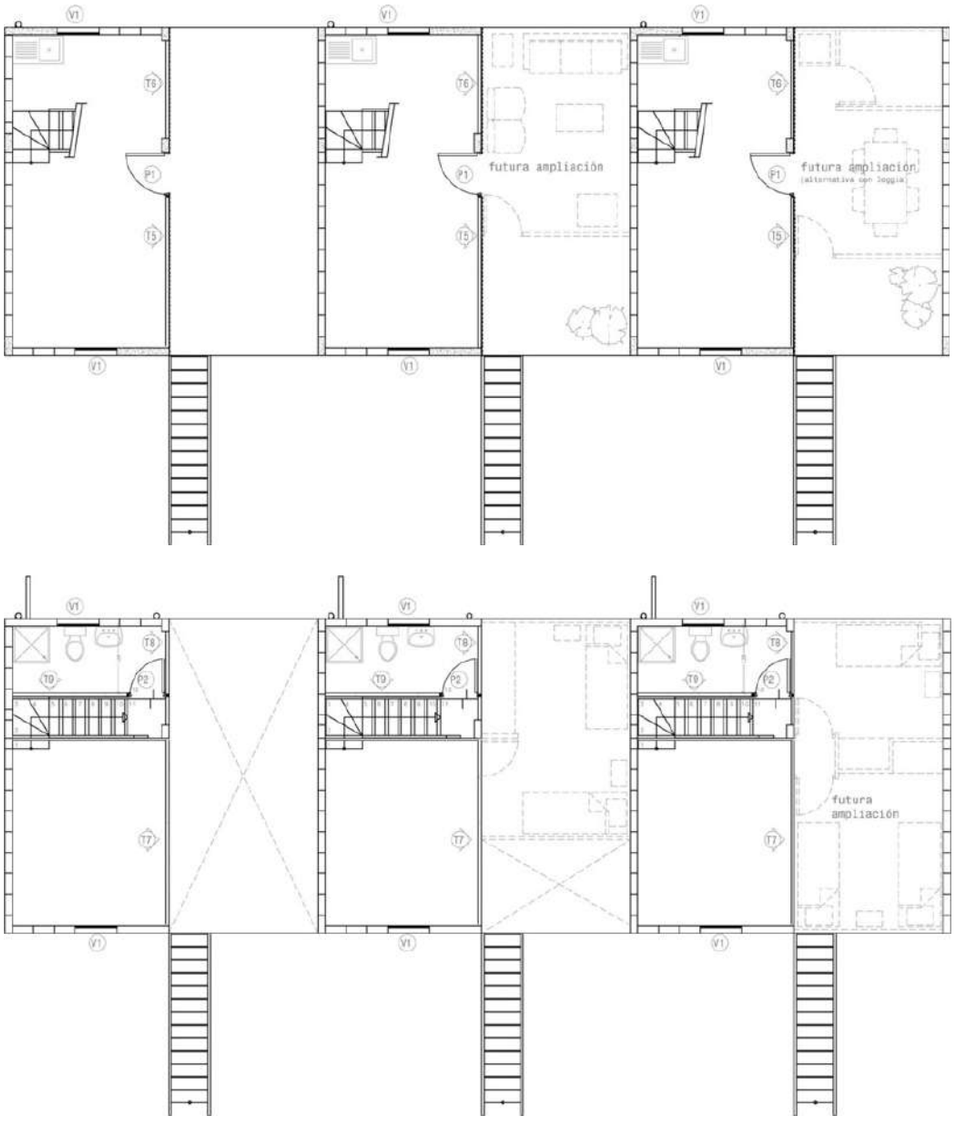
La selezione dei casi studio è stata condotta sulla base di criteri di pertinenza rispetto al tema, ovvero la presenza di condizioni esplicite di adattabilità potenzialmente in grado di favorire processi di inclusione ed equità, di rilevanza del fenomeno osservato, nei casi in cui l'adattabilità costituisce una componente centrale del progetto o del processo di trasformazione, e di diversificazione dei progetti analizzati, al fine di costruire un insieme comparabile ma eterogeneo, capace di restituire la complessità del fenomeno indagato. I casi individuati sono interpretati come configurazioni paradigmatiche, attraverso le quali rendere leggibili specifiche relazioni tra sistema edilizio, pratiche d'uso e governance e mettere in evidenza il modo in cui queste relazioni contribuiscono, in modo differenziato, alla costruzione di condizioni più o meno inclusive, contribuendo al progressivo affinamento del modello.

Sistema edilizio, sistema d'uso e sistema di governance: tre casi di edilizia residenziale sociale a confronto | Nelle esperienze di edilizia residenziale sociale sviluppate da Elemental, studio di architettura e ricerca fondato e diretto dall'architetto Alejandro Aravena, il progetto architettonico definisce intenzionalmente soltanto gli elementi essenziali dell'abitazione, lasciando agli abitanti la possibilità di completare e trasformare gli spazi nel tempo, spesso attraverso processi di autocostruzione. La proposta nasce per il reinsediamento delle famiglie della Quinta Monroy (Cile), un insediamento informale composto da 97 nuclei familiari che, a partire dagli anni Sessanta del Novecento, si era sviluppato abusivamente nel centro della città cilena di Iquique.

In questo contesto l'adattabilità del sistema edilizio (Askar, Bragança and Gervásio, 2021) e l'approccio tecnologico incrementale (O'Brien, Carrasco and Dovey, 2020) costituiscono una risposta concreta al problema della segregazione periferica tipica dell'edilizia sociale. La strategia della 'mezza casa' (Fig. 1) ha infatti consentito di destinare una parte significativa delle risorse pubbliche disponibili all'acquisto dello stesso terreno precedentemente occupato illegalmente, garantendo così il reinsediamento dei residenti nello stesso luogo e preservandone l'accesso ai servizi urbani (Fig. 2).

Il progetto prevede abitazioni a due piani disposte attorno a spazi vuoti progettati per consentire future espansioni secondo linee guida prestabilite. La struttura è progettata per essere ampliata fino a raggiungere una superficie di circa 72 m^2, con un incremento volumetrico del 50% per ogni unità (Fig. 3). In questo modo il 'vuoto' predisposto dal progetto si configura come una risorsa adattabile che consente agli abitanti di definire autonomamente nuovi ambienti domestici o spazi destinati ad attività produttive (Figg. 4, 5; Privitera, 2016). Questa possibilità consente di trasformare un modesto contributo pubblico in un bene immobiliare di valore economico, contribuendo a ridurre nel lungo periodo il divario di ricchezza. È tuttavia evidente che l'efficacia di questo modello dipende in larga misura dalle capacità economiche e tecniche delle famiglie di completare e trasformare l'abitazione: in assenza di adeguate risorse o competenze il processo incrementale potrebbe generare esiti disomogenei o rallentare nel tempo, producendo nuove differenze e disuguaglianze.

Diversamente dal caso precedente, in cui l'adattabilità è legata alla trasformazione fisica dello



Figg. 4, 5 | Quinta Monroy residential building in Iquique, floor plan of the first and second floor (2004), designed by Alejandro Aravena (source: archdaily.com, 2026).



Fig. 6 | The transformation of 530 homes in Bordeaux, extended façades with enclosed balconies (2017), designed by Lacaton & Vassal Architectes, Frédéric Druot Architecture, and Christophe Hutin Architecture (source: archdaily. com, 2026).

spazio, il progetto di riconversione di tre edifici di edilizia sociale degli anni Sessanta nel quartiere Grand Parc di Bordeaux (Francia) rappresenta un esempio significativo di come essa possa agire, nel contrasto alle disuguaglianze, attraverso il sistema d'uso degli ambienti. L'intervento, realizzato dagli studi Lacaton & Vassal Architectes, Frédéric Druot Architecture e Christophe Hutin Architecture, costituisce la prima fase del programma di riqualificazione della Cité du Grand Parc (Fig. 6).

La strategia progettuale si fonda sulla conservazione dei singoli edifici esistenti, evitando interventi invasivi sulla struttura portante, scelta che ha consentito di ridurre significativamente i costi dell'intervento e di concentrare le risorse sull'ampliamento degli alloggi (Trzcinska, 2021). Il progetto introduce infatti una nuova struttura prefabbricata esterna che amplia ogni appartamento con giardini d'inverno e balconi profondi (Shahi et alii, 2020). Tali ampliamenti accrescono sensibilmente la superficie utilizzabile delle abitazioni, con incrementi compresi tra il 30% e il 90% (Figg. 7, 8).

Sebbene gli spazi aggiunti siano definiti dal progetto e le possibilità di personalizzazione non dipendano direttamente dall'iniziativa dei residenti, essi offrono un sensibile miglioramento delle condizioni abitative e nuove modalità di fruizione dello spazio domestico. In edifici originariamente caratterizzati da appartamenti di dimensioni ridotte e da limitate possibilità di articolazione funzionale, questi spazi fungono da ambienti intermedi tra interno ed esterno e, grazie alla loro modulabilità climatica e alla relativa indeterminatezza funzionale, consentono agli abitanti di estendere e reinterpretare lo spazio domestico in relazione alle esigenze quotidiane (Figg. 9, 10).

Un progetto emblematico, in cui l'adattabilità rappresenta l'aspetto principale del sistema di governance, è La Borda, a Barcellona (Spagna), un intervento di edilizia cooperativa avviato nel 2012 nell'ambito della rigenerazione dell'ex zona industriale di Can Batlló. L'iniziativa, nata dal basso per affrontare la crisi abitativa della città (Cabré and Andrés, 2018), ha portato alla stipula di un contratto di locazione del terreno comunale della durata di 75 anni. L'autopromozione e la successiva gestione collettiva rendono la partecipazione uno dei pilastri del progetto: la collaborazione tra la Pubblica Amministrazione e la cooperativa di architettura Lacol ha generato un processo di responsabilizzazione dei futuri residenti che, nelle fasi di co-progettazione, ha messo in discussione l'individualizzazione dell'abitare, privilegiando forme collettive e flessibili (Figg. 11, 12). In questo senso l'adattabilità del sistema di governance si manifesta nella capacità della comunità di definire e modificare nel tempo le regole di gestione e gli usi degli spazi, rendendo il sistema abitativo più inclusivo e più capace di rispondere a condizioni sociali ed economiche mutevoli.

Il progetto si basa su una riorganizzazione del rapporto tra spazio privato e spazio collettivo, che prevede la riduzione della superficie complessiva delle singole abitazioni, la concentrazione di servizi destinati all'uso comune e l'incremento di ambienti dedicati ad attività collettive eterogenee (Figg. 13, 14). Dal punto di vista costruttivo l'organizzazione modulare e il sistema strutturale a griglia permettono di adattare nel tempo la dimensione degli alloggi: ogni appartamento è costituito da un nucleo base di circa 50 m^2, al quale possono essere aggiunti uno o due moduli supplementari, così da ottenere configurazioni più ampie (Fig. 15). La gestione cooperativa consente di redistribuire costi e risorse tra gli abitanti, riducendo l'incidenza individuale delle spese abitative e favorendo forme di mutualismo all'interno della comunità. Tuttavia un processo di autopromozione e gestione di questo tipo richiede un elevato livello di partecipazione e di coordinamento tra gli abitanti, condizioni non sempre facilmente raggiungibili in contesti caratterizzati da maggiore fragilità sociale. L'adattabilità del sistema di governance rivela quindi un forte potenziale nel contrasto alle disuguaglianze abitative, ma richiede adeguati supporti istituzionali e sociali per consolidarsi e diffondersi.

Nel caso di Quinta Monroy l'adattabilità è affidata principalmente al sistema edilizio e alla possibilità di trasformazione fisica dell'unità abitativa: la relazione tra spazio e uso è immediata e demandata all'intervento diretto degli abitanti. Nel progetto della Cité du Grand Parc l'intervento sulla preesistenza introduce una nuova fascia spaziale che amplia le possibilità di fruizione degli ambienti domestici: in questo caso la trasformazione passa attraverso la reinterpretazione autonoma degli spazi aggiunti, caratterizzati da un elevato grado di indeterminatezza funzionale. La relazione tra spazio e uso questa volta risulta mediata dal progetto e poco influenzata dal sistema di governance. Quest'ultima emerge invece chiaramente nel caso di La Borda, dove la presenza di un modello cooperativo e di processi decisionali condivisi consente di intervenire sul sistema edilizio e sul sistema d'uso, nonché sulle regole che ne definiscono l'organizzazione e la gestione nel tempo. I tre sistemi in questo caso risultano fortemente interrelati: la struttura modulare dell'edificio supporta configurazioni

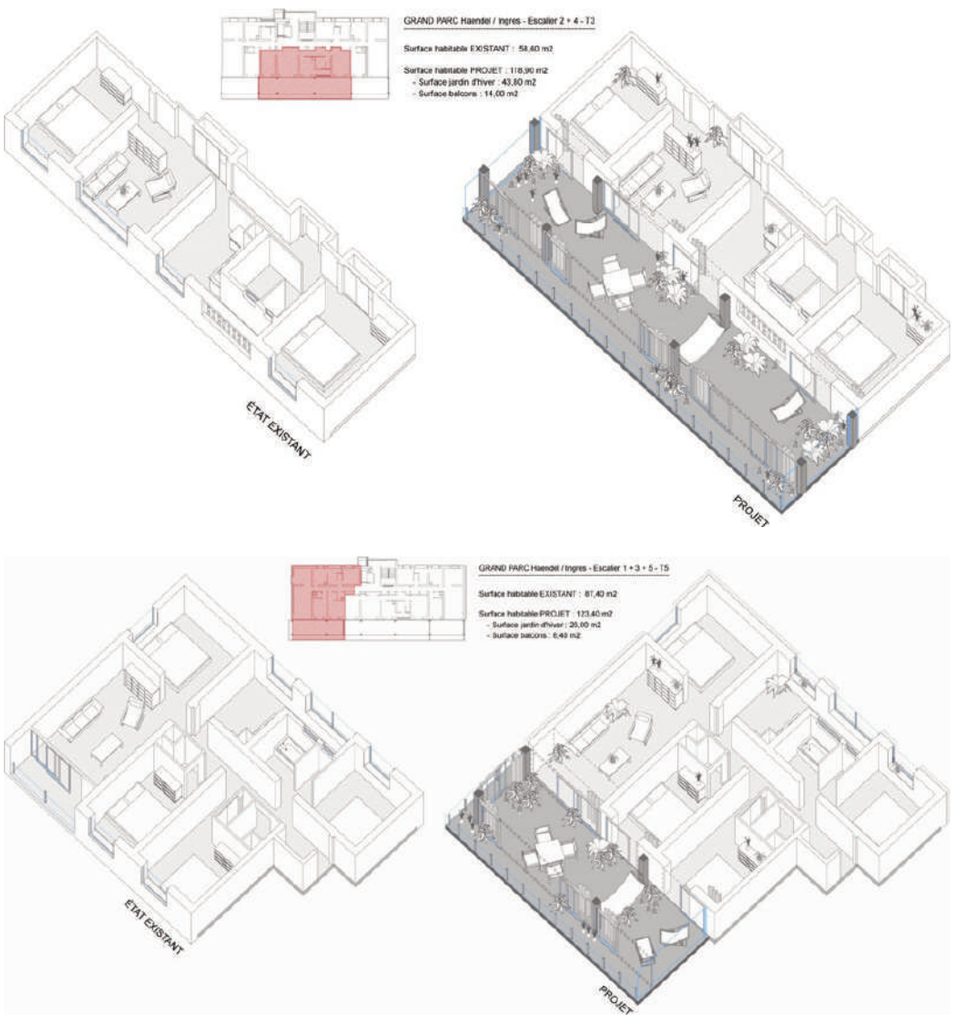
variabili e la gestione collettiva e permette di ridefinire le modalità d'uso e la distribuzione delle risorse (Tab. 1).

La comparazione dei tre casi studio permette di evidenziare le tensioni e le discontinuità che emergono quando i tre sistemi interpretativi dell'adattabilità non risultano adeguatamente integrati tra loro, portando a concludere che l'efficacia dei processi adattivi non dipende dal successo di una singola dimensione e che l'inclusività non è una qualità intrinseca, ma l'esito di specifiche relazioni tra tali dimensioni.

Conclusioni | L'esame dei casi studio può essere riletto alla luce della distinzione teorica tra circostanze materiali e immateriali che concorrono alla produzione dell'ambiente costruito. Se le disuguaglianze di origine intangibile, radicate in dinamiche sociali, economiche e politiche più ampie, risultano difficilmente modificabili attraverso il progetto architettonico e tecnologico quest'ultimo può, tuttavia, intervenire sulle loro manifestazioni tangibili nello spazio. Da questa prospettiva l'ambiente costruito diventa il luogo in cui le disuguaglianze sociali si rendono visibili e in cui è possibile sperimentare risposte progettuali concepite per affrontare la natura dinamica e cumulativa delle disuguaglianze spaziali, evitando assetti spaziali eccessivamente rigidi e suscettibili di consolidare condizioni di esclusione o di favorirne la comparsa futura.

L'originalità del contributo risiede dunque nel considerare l'inclusività e l'adattabilità come dimensioni strettamente interrelate del progetto: da un lato l'inclusività orienta il processo progettuale verso il riconoscimento della pluralità dei soggetti e delle pratiche d'uso, dall'altro l'adattabilità mette a disposizione gli strumenti spaziali e tecnologici necessari affinché tale pluralità possa essere accolta e sostenuta nel tempo.

Al tempo stesso i risultati devono essere letti alla luce di alcuni limiti: il numero contenuto di casi studio approfonditi e il loro carattere paradigmatico non consentono generalizzazioni estensive. Inoltre i casi analizzati evidenziano alcune barriere alla diffusione di approcci adattivi orientati all'inclusione, riconducibili a fattori culturali, legati alla persistenza di una concezione statica del progetto, economici, connessi alla distribuzione dei costi nel tempo, istituzionali e normativi, spesso poco compatibili con configurazioni aperte e trasformabili, e tecnico-gestionali e partecipativi, che richiedono competenze e condizioni organizzative non sempre disponibili. Le evidenze emerse suggeriscono che il rapporto tra adattabilità e inclusività è fortemente condizionato da fattori locali e che alcune soluzioni (in particolare quelle legate a processi incrementali o a modelli di governance partecipativa) non risultano automaticamente generalizzabili: se l'adattabilità non è accompagnata da adeguati dispositivi di supporto e regolazione (da adattare in relazione alle specificità dei contesti sociali, economici e normativi) rischia di trasferire sui singoli la responsabilità della trasformazione, con effetti potenzialmente selettivi e controproducenti rispetto agli obiettivi di inclusione. La ricerca si configura pertanto come un primo passo all'interno di un percorso più ampio, che prevede l'estensione dell'analisi a un insieme più articolato di casi studio e lo sviluppo di strumenti operativi capaci di tradurre il modello interpretativo in criteri e linee guida progettuali orientate a supportare, nel tempo, la costruzione di ambienti più inclusivi.

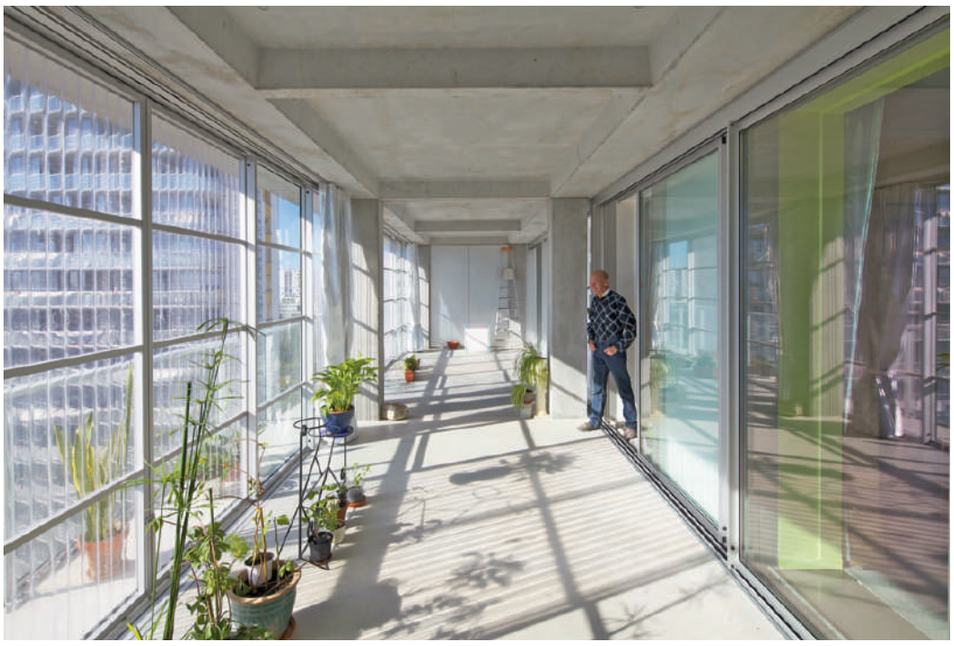


Figg. 7, 8 | The transformation of 530 homes in Bordeaux, T3 and T5 apartment units (2017), designed by Lacaton & Vassal Architectes, Frédéric Druot Architecture, and Christophe Hutin Architecture (source: archdaily.com, 2026).

In the final decades of the last century, there was a growing realisation that any production process is closely linked to the context in which it takes place. Based on this deep connection, which is evident both in the material aspects of the product and in the social and cultural components of the processes, an integrated view of technology has emerged. Moving beyond a positivist interpretation, there has been a growing trend towards greater integration between the spheres of experts and users, beginning with a reconsideration of the technical, organisational, and cultural circumstances within which every technological practice takes place (Pacey, 1983).

It is now well established that technology is not limited to the more or less complex physical transformation of matter into artefacts, as it has taken on an ethical dimension that affects multiple aspects of individual and collective life (Germanà, 2024). Within this framework, a sociological component recognisable in the production of artefacts has taken on increasing importance, as demonstrated by the SCOT (Social Construction of Technology) approach, which has highlighted the effects of the conditioning exercised by social groups in addressing issues related to technological production (Pinch and Bijker, 1984; Collins and Pinch, 2009).

If we view the built environment as the totality of artefacts resulting from construction activities, regardless of the scale of observation, intended use, or the values and meanings attributed to them, the integrated view of material and immaterial aspects, applicable to any technological product, takes on a far greater level of complexity, subject to constant variations caused by intentional or causal factors (Di Battista, 2006): on the one hand, the link with the context becomes even more deeply rooted in





Figg. 9, 10 | The transformation of 530 homes in Bordeaux, enclosed balconies viewed from the inside (2017), designed by Lacaton & Vassal Architectes, Frédéric Druot Architecture, and Christophe Hutin Architecture (source: archello.com, 2026).

specific environmental conditions, including microclimatic ones; on the other, the anthropogenic context becomes denser with a network of dynamic relationships, crossed by significant economic interests, cultural influences, and social structures. It is precisely in the interplay between material and immaterial aspects, through which the built environment gives physical form to society, that many of the inequalities emerging in urban contexts take shape.

In light of these premises, this paper interprets adaptability (Schmidt III et alii, 2010) not merely as a technical property, but as a multifaceted, integrated category, examined comparatively across three cases involving different regimes of transformation, capable of counteracting the production and reproduction of inequalities in the built environment. The text is divided into three parts: the first section frames the relationship between the built environment and social inequalities, the second explores the paradigm of adaptability, whilst the third analyses three case studies through the interpretative lenses of the building system, the usage system, and the governance system.

This paper addresses the scientific community of Technological and Environmental Design of Architecture and presents the preliminary findings of an ongoing research project investigating design strategies based on the principles of adaptability and reversibility, through an approach centred on the progressive transformation of the built environment and its capacity to respond over time to changing requirements in terms of use and management. This paper forms part of this research programme, which aims to develop a multi-criteria evaluation framework applicable, with appropriate adaptations, to different contexts and scales, helping to bridge the existing fragmentation between disciplinary approaches and guiding the scientific community towards a more systemic and process-oriented understanding of Technological and Environmental Design of Architecture.

The built environment as a social phenomenon: inequalities between the tangible and intangible dimensions | The reciprocal relationship between human settlements and social structures is evident in the configuration of the built environment, which can be defined as a tangible manifestation of society (Lee, 1976) and which, at the same time, both shapes and is shaped by it. It is well known, for example, that settlements characterised by a compact road network and the coexistence of different activities significantly facilitate social relations compared to low-density dormitory neighbourhoods (Mouratidis, 2018); conversely, an example of how society can influence the built environment is the role played by 'host communities' in the conservation of built heritage (Xu, Tang and Zhang, 2024).

The issue of inequality must be understood within the context of the reciprocal influence between the built environment and society, both to comprehend it fully and to identify possible courses of action. The variations observed in the built environment, at the regional or urban scale, can have a positive significance when they express a sense of identity and counteract the global homogenisation of 'non-places'. When, however, such differences reflect hierarchical and privileged positions that negatively impact people's lives, they constitute undesirable 'spatial and urban inequalities' (Storper, 2024).

The social inequalities reflected in the built environment may stem from intangible or tangible circumstances. When they stem from intangible conditions, their causes are primarily linked to the growing imbalance in the distribution of wealth and income. These are now deeply entrenched inequalities that are difficult to avoid, produced by political and economic choices which, throughout history, have systematically favoured elite minorities, becoming increasingly widespread and complex over time, with specific consequences evident in numerous specific cases (Bellini and Martorana, 2025).

The 2030 Agenda (UN, 2015) places particular emphasis on the financial dimension through SDG 10, which is dedicated to reducing inequalities within and between countries, as demonstrated by the relevant indicators. However, there is now a growing awareness that economic inequalities are intertwined with environmental and political inequalities, amplifying the effects of income gaps and having repercussions in other areas: social con-





Figg. 11, 12 | La Borda residential housing cooperative in Barcelona, user involvement in design processes (2018), designed by Lacol Architecture Cooperative (source: archello.com, 2026).

flicts, political instability and inequities in exposure to the adverse effects of climate change. For this reason, it seems essential to complement actions directly focused on financial aspects, such as the tax system, with indirect measures such as «[…] investment in human capabilities, climate accountability tied to private capital ownership, and inclusive political institutions capable of rebuilding trust and solidarity» (Chancel et alii, 2026, p. 11).

Indirect measures to combat inequalities include those that address their manifestations in the built environment in various ways (Ricci, Poli and Marino, 2025; Cangelli, 2025), whilst acknowledging that these inequalities will continue to exist within a realistic timeframe of the present and the future. From this perspective, inequalities contribute to the formation of the phenomenon of marginalisation, which requires a multi-level (Oppido, Ragozino and Esposito De Vita, 2023) and multidimensional (Varghese and Kumar, 2022) approach. As this is a cumulative phenomenon, transformations of the built and unbuilt environment, through material and technical improvements, the use of energy and the mobilisation of human capital, can help to alter the condition of marginalisation, whether real or perceived (Pulighe et alii, 2019).

Therefore, whilst inequalities of an intangible nature are difficult to tackle in themselves, it is conceivable that they might be countered by addressing their physical repercussions on the built environment. The contexts most conducive to testing such a hypothesis are cities, places where the proximity of different social groups, the greater emphasis on the common good and the wider scope for the redistribution of resources make it possible to experiment with new strategies, on condition that there is 'daily and inclusive governance' (Vitale, 2024).

To produce concrete results, strategies for redressing inequalities must be contextualised because, according to Vitale (2024), in order to redress inequalities, the point is not only what to do or how to redistribute resources to the less well-off, but to decide where to invest, where to locate infrastructure and job opportunities, and which areas require inclusive accessibility and improved mobility. Furthermore, such strategies must be capable of enduring in the long term, since a call for flexible and adaptive institutional agreements and plans must not become a reactionary intellectual excuse for inconsistent and ineffective implementation. Although the causes are distant, the effects of inequalities in terms of social costs are very close at hand and potentially explosive; for this reason, local governments are increasingly being called upon to act, and it is hoped that the city will be considered a place of continuous learning, where one of the key resources is the co-creation of public knowledge, and where criticism and participation are essential democratic tools for governing change (Vitale, 2024).

Technological and Environmental Design of Architecture and inequalities in the built environment | Within the general framework outlined above, inequalities attributable to tangible causes typically fall within the operational field of Technological Design in Architecture. These are linked to physical characteristics, such as changes in level, dimensional constraints or surface configurations, which are present throughout the built environment and have the potential to hinder the full expression of human existence, with repercussions on individuals, families, communities, and society as a whole (Lauria, 2017). Such impediments create inequalities in the use of living environments, both open and enclosed, affecting the level of accessibility and potentially concerning any social group, regardless of economic status, age or gender.

Staying within the realm of the tangible, a different situation arises with regard to barriers to access that do not stem from the characteristics of the built environment, but are intentionally introduced to exclude certain groups of people considered marginalised and unwelcome, as they do not conform to dominant social norms (Nielsen, 2024). Design for All and Hostile Architecture represent two approaches to technological design that differ in the way they define objectives in relation to limitations of use: the former tends to eliminate them in order to remove inequalities; the latter deliberately introduces them, thereby confirming and reinforcing them. This highlights the need to abandon the comforting presumption of neutrality in technological design, recognising its essential ethical dimension.

As regards inequalities of an intangible nature, the contribution of Technological and Environmental Design of Architecture must grapple with a fluid and constantly evolving phenomenon, as illustrated by the origins of marginalisation, whose causal factors may be temporary or permanent, acting suddenly, as in the case of natural disasters, or gradually, as in the processes triggered by neglect. The main roots of social inequalities lie in wealth and income, the trends of which fluctuate, impoverishing social groups not traditionally considered vulnerable, who may become so within a single generation. Furthermore, it is foreseeable that the growing scarcity of resources and the recurrence of emergency conditions will contribute to spreading and exacerbating social inequalities.

For this reason, Technological Design draws on a theoretical and methodological aspect that sets it apart: the discipline's ability to incorporate the variable of time into the processes of formation and transformation of the built environment, seeking mediation rather than opposition between the poles of permanence and temporariness (Germanà, 2018).

In today's dominant paradigm, the circular view of time has replaced the linear one, dispelling the utopia of unlimited duration and uncontrolled temporariness, both of which are incoherent with the principle of sustainability: the extremes of production, from the sourcing of raw materials to the generation of waste and refuse, tend to overlap; the stages of processes are increasingly intertwined and interoperability facilitates interactions between different actors. Similarly, the contemporary paradigm juxtaposes the flow of chronological time, quantifiable and inexorable, with 'kairotic time': a



Figg. 13, 14 | La Borda residential housing cooperative in Barcelona, interior spaces (2018), designed by Lacol Architecture Cooperative (source: archello.com, 2026).

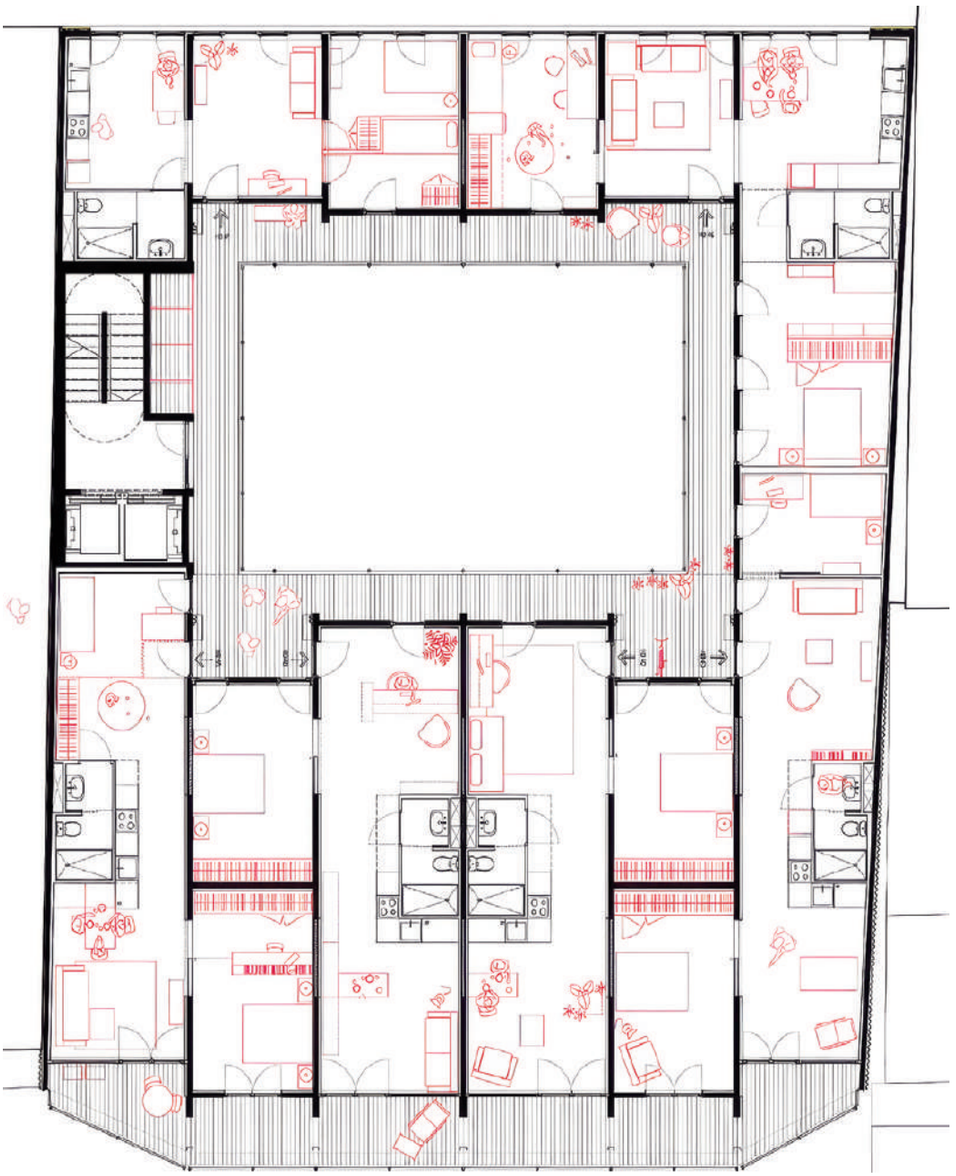


Fig. 15 | La Borda residential housing cooperative in Barcelona, 3rd and 4th floor plan (2018), designed by Lacol Architecture Cooperative (source: detail.de, 2026).

qualitative time, focused on a defined moment that becomes an occasion or opportunity, in relation to which human actions take on ethical value (Germanà, 2025).

The kairotic view of time can lead us to abandon definitive solutions, those deemed valid for everyone and for all time, in order to seize the opportunity, even when inequalities already exist or are likely to arise, to orient design choices towards «[…] values such as dignity, autonomy, reparability, maintenance, and sharing. Designing with and in poverty means accepting the constraint, exploring the limit, restoring meaning to what is fragile […]: it means rewriting a grammar of that which is necessary, which places relationship, not form, at the centre» (Valenti et alii, 2025, p. 66).

The relationships with which such a 'grammar of necessity' engages are subject to change over time; for this reason, the indicators of care, participation, modularity, and reparability must also be complemented by that of adaptability.

Inclusivity and adaptability as mutually constitutive conditions of spatial equity | In a context marked by growing social, economic and environmental instability, Technology and Environmental Design in Architecture is called upon to address the mutability of material and immaterial circumstances which, within the built environment, generate new conditions of exposure to vulnerability (Pathiraja, 2025).

The unpredictability of needs, conflicting with the traditional resistance to change inherent in the built environment, indeed contributes to the production and reproduction of spatial inequalities (Candeloro et alii, 2025); if such inequalities take on dynamic and cumulative forms, design responses must also be able to evolve, avoiding rigid spatial configurations that risk crystallising conditions of exclusion or generating new ones over time. From this perspective, adaptability emerges as a strategic quality of architectural and technological design (Heidrich et alii, 2017), as it allows for the transformation of spaces over time, in response to changing spatial inequalities, and ensures continuity of access, use, and appropriation.

In this sense, strategies such as spatial reconfigurability, functional flexibility, and indeterminacy of use (Schneider and Till, 2007) can be interpreted as operational manifestations of a design paradigm in which inclusivity and adaptability coincide (Calcagnini, 2023). This interpretation is based on the definition of 'flexible design' (Baratta, Conti and Tatano, 2024), which understands flexibility as a design strategy intented to strengthen the resilience of the user-space-facilities system, by referring to a degree of active and conscious adaptability. The idea of adaptability in architecture derives largely from the theory of 'open building', developed in the 1960s in response to the challenges posed by the high demand for housing in the post-war period. In the book Supports – An Alternative to Mass Housing, architect N. John Habraken (1972) introduces a design model that clearly distinguishes between two building systems: the main structure, the 'base building', defined by the developer or investor, and the internal finishing elements, the 'fill-out', which can be organised and transformed by the inhabitants according to their own needs.

In this sense, adaptability and inclusivity can be interpreted as mutually constitutive conditions: whilst the former directs the design towards recognising the plurality of users and usage practices (Germanà, 2021), the latter provides the spatial and technological tools necessary to accommodate this plurality over time (Tsoka and Tsikaloudaki, 2025). Viewed in these terms, adaptability cannot be reduced to a mere technical property of architecture, but must be understood as a complex mechanism (van Ellen et alii, 2021), involving simultaneously spatial configurations, housing practices, and management models.

It should be noted that the relationship between adaptability and inclusivity can refer to the entire built environment system, understood as a social phenomenon, and not merely to the building scale. Design approaches geared towards the progressive transformation of spaces over time, including through the involvement of users in processes of appropriation and use, can be tested at various scales of the built environment (Sgobbo and Moccia, 2016), helping to shape contexts that are more open to the diversity of social conditions and less exposed to the production and reproduction of spatial inequalities.

In particular, social housing, aimed at a section of the population characterised by diverse and changing economic conditions over time, is increasingly interpreted as a dynamic process rather than a static condition (Battaino, Fossati and Marconi, 2025): from this perspective, home represents a privileged vantage point for analysing the relationships between the configuration of the built environment and the dynamics of inequality.

Methodological approach | The study is based on an interpretative model of adaptability, developed from the relevant literature and structured around three dimensions of the building system, the usage system, and the governance system, understood as interrelated frameworks through which to observe how projects respond to changing social and economic conditions. The building system concerns the technological and spatial

System	Indicator	Quinta Monroy, Chile (Elemental)	Cité du Grand Parc, France (Lacaton & Vassal + Druot + Hutin)	La Borda, Spain (Lacol)
Building system	Structural configuration	Partial unit + expandable volume	Existing buildings + independent external addition	Modular grid structure
	Transformation mechanism	Incremental self-expansion	Predefined prefabricated extension	Modular aggregation / reduction
	Control of transformation	User-driven	Project-driven	Hybrid
Use system	Use regime	Self-directed	Flexible within defined space	Individually and collectively regulated
	Functional flexibility	High (undefined spaces)	Medium (adaptable extensions)	High (negotiable uses)
	User agency	Active transformer	Adaptive user	Co-manager of use
Governance system	Governance model	Individual ownership	Public management	Cooperative
	Decision-making	Individual	Institutional	Collective
	Participation level	Medium	Low	High
Interaction between systems	Building / Use	High	Medium	High
	Use / Governance	Medium	Medium	High
	Governance / Building	High	Low	High
	Overall integration	Medium	Medium	High

Tab. 1 | Comparative adaptability across the case studies (credit: the Authors, 2026).

choices that enable the transformation of spaces; the system of use refers to housing practices and the ways in which users appropriate their environments; the governance system concerns the involvement of residents in decision-making processes and forms of building management. From this perspective, adaptability is conceived as a property, whether existing or planned, to be analysed at multiple levels.

The selection of case studies was based on criteria of relevance to the theme, namely the presence of explicit conditions of adaptability that could potentially promote processes of inclusion and equity; the significance of the phenomenon observed, in cases where adaptability constitutes a central component of the project or transformation process; and the diversity of the projects analysed, in order to construct a comparable yet heterogeneous set, capable of reflecting the complexity of the phenomenon under investigation. The identified cases are interpreted as paradigmatic configurations, through which specific relationships between the building system, usage practices, and governance can be made legible, and which highlight the way in which these relationships contribute, in different ways, to the creation of more or less inclusive conditions, thereby contributing to the progressive refinement of the model.

Building system, system of use, and governance system: a comparison of three social housing projects | In the social housing projects developed by Elemental, an architecture and research studio founded and directed by architect Alejandro Aravena, the architectural design intentionally defines only the essential elements of the dwelling, leaving residents free to complete and transform the spaces over time, often through self-build processes. The proposal was conceived for the resettlement of families from Quinta Monroy (Chile), an informal settlement comprising 97 households which, from the 1960s onwards, had developed illegally in the centre of the Chilean city of Iquique.

In this context, the adaptability of the building system (Askar, Bragança and Gervásio, 2021) and the incremental technological approach (O'Brien, Carrasco and Dovey, 2020) constitute a concrete response to the problem of peripheral segregation typical of social housing. The 'half-house' strategy (Fig. 1) has in fact made it possible to allocate a significant portion of available public resources to the purchase of the land previously occupied illegally, thereby ensuring the resettlement of residents in the same location and preserving their access to urban services (Fig. 2).

The project comprises two-storey dwellings arranged around open spaces designed to allow for future expansion according to pre-established guidelines. The structure is designed to be extended to a floor area of approximately 72 m^2, with a 50% increase in volume for each unit (Fig. 3). In this way, the 'empty space' provided by the project is configured as an adaptable resource that allows residents to independently define new domestic environments or spaces intended for productive activities (Figg. 4, 5; Privitera, 2016). This possibility allows a modest public contribution to be transformed into a property of economic value, helping to reduce the wealth gap in the long term. It is nevertheless clear that the effectiveness of this model depends to a large extent on the economic and technical capabilities of households to complete and transform the dwelling: in the absence of adequate resources or skills, the incremental process could generate uneven outcomes or slow down over time, producing new differences and inequalities.

Unlike the previous case, where adaptability is linked to the physical transformation of space, the project for the conversion of three social housing blocks from the 1960s in the Grand Parc district of Bordeaux (France) provides a significant example of how adaptability can help tackle inequality through the way spaces are used. The project, carried out by the firms Lacaton & Vassal Architectes, Frédéric Druot Architecture and Christophe Hutin Architecture, constitutes the first phase of the regeneration programme for the Cité du Grand Parc (Fig. 6).

The design strategy is based on the preservation of the existing individual buildings, avoiding invasive interventions on the load-bearing structure, a choice that has made it possible to significantly reduce the costs of the project and to concentrate resources on the extension of the dwellings (Trzcinska, 2021). The project introduces a new external prefabricated structure that extends each flat with winter gardens and deep balconies (Shahi et alii, 2020). These extensions significantly increase the usable floor area of the dwellings, with increases ranging from 30% to 90% (Figg. 7, 8).

Although the additional spaces are defined by the project and the possibilities for personalisation do not depend directly on the initiative of the residents, they offer a significant improvement in living conditions and new ways of using domestic space. In buildings originally characterised by small-sized flats and limited possibilities for functional articulation, these spaces act as intermediate environments between interior and exterior and, thanks to their climatic adaptability and relative functional indeterminacy, allow residents to extend and reinterpret domestic space in relation to their daily needs (Figg. 9, 10). An emblematic project, in which adaptability is the key feature of the governance

system, is La Borda in Barcelona (Spain), a cooperative housing intervention launched in 2012 as part of the regeneration of the former industrial area of Can Batlló. The initiative, a bottom-up response to the city's housing crisis (Cabré and Andrés, 2018), led to the signing of a 75-year lease on municipal land. Self-promotion and subsequent collective management make participation one of the project's cornerstones: the collaboration between the public administration and the Lacol architecture cooperative has fostered a process of empowerment among future residents who, during the co-design phases, challenged the individualisation of housing, favouring collective and flexible forms (Figg. 11, 12). In this sense, the adaptability of the governance system is evident in the community's ability to define and modify, over time, the rules of management and the uses of spaces, making the housing system more inclusive and better able to respond to changing social and economic conditions.

The project is based on a reorganisation of the relationship between private and collective spaces, involving a reduction in the total floor area of individual dwellings, the concentration of services for communal use, and an increase in spaces dedicated to a variety of communal activities (Figg. 13, 14). From a construction perspective, the modular layout and grid-based structural system allow the size of the dwellings to be adapted over time: each flat consists of a basic unit of approximately 50 m^2, to which one or two additional modules can be added, thereby creating larger layouts (Fig. 15).

Cooperative management allows costs and resources to be redistributed among residents, reducing the individual burden of housing costs and fostering forms of mutual aid within the community. However, a process of self-promotion and management of this kind requires a high level of participation and coordination among residents, conditions that are not always easily achieved in contexts characterised by greater social fragility. The adaptability of the governance system therefore reveals strong potential in combating housing inequalities, but requires adequate institutional and social support to become established and spread.

In the case of Quinta Monroy, adaptability relies primarily on the building system and the potential for physical transformation of the dwelling unit: the relationship between space and use is immediate and depends on the direct involvement of the residents. In the Cité du Grand Parc project, the intervention on the existing structure introduces a new spatial zone that expands the possibilities for using domestic spaces: in this case, the transformation occurs through the autonomous reinterpretation of the added spaces, characterised by a high degree of functional indeterminacy. The relationship between space and use is, in this case, mediated by the design and only marginally little influenced by the governance system. The latter, however, emerges clearly in the case of La Borda, where the presence of a cooperative model and shared decision-making processes allows for intervention on the building system and the system of use, as well as on the rules that define their organisation and management over time. In this case, the three systems are strongly interrelated: the building's modular structure supports variable configurations and collective management, and allows for the redefinition of modes of use and the distribution of resources (Tab. 1).

The comparison of the three case studies highlights the tensions and discontinuities that arise when the three interpretative frameworks of adaptability are not adequately integrated with one another, leading to the conclusion that the effectiveness of adaptive processes does not depend on the success of any single dimension, and that inclusivity is not an intrinsic quality but rather the outcome of specific relationships between these dimensions.

Conclusions | The examination of the case studies can be re-read in light of the theoretical distinction between material and immaterial circumstances that contribute to the production of the built environment. Whilst inequalities of an intangible nature, rooted in broader social, economic, and political dynamics, are difficult to alter through architectural and technological design, the latter can nevertheless address their tangible manifestations in space. From this perspective, the built environment becomes the place where social inequalities become visible and where it is possible to experiment with design responses conceived to address the dynamic and cumulative nature of spatial inequalities, avoiding spatial configurations that are excessively rigid and likely to reinforce conditions of exclusion or encourage their future appearance. The originality of this contribution therefore lies in considering inclusivity and adaptability as closely interrelated dimensions of the design process: on the one hand, inclusivity directs the design process towards recognising the diversity of users and usage practices; on the other, adaptability provides the spatial and technological tools necessary to ensure that this diversity can be accommodated and sustained over time.

At the same time, the results must be interpreted in light of certain limitations: the limited number of in-depth case studies and their paradigmatic nature do not allow for broad generalisations. Furthermore, the cases analysed highlight certain barriers to the dissemination of adaptive inclusion-oriented approaches, attributable to cultural factors, linked to the persistence of a static conception of design; economic factors, related to the distribution of costs over time; institutional and regulatory factors, which are often incompatible with open and transformable configurations; and technical-managerial and participatory factors, which require skills and organisational conditions that are not always available.

The evidence suggests that the relationship between adaptability and inclusivity is strongly influenced by local factors and that certain solutions (particularly those linked to incremental processes or participatory governance models) cannot automatically be applied across the board: if adaptability is not accompanied by adequate support and regulatory mechanisms (to be adapted to the specificities of social, economic, and regulatory contexts), there is a risk of shifting the responsibility for transformation onto individuals, with effects that may be selective and counterproductive to the objectives of inclusion. The research therefore constitutes a first step within a broader process, which involves extending the analysis to a more comprehensive set of case studies and developing operational tools capable of translating the interpretative model into criteria and design guidelines aimed at supporting, over time, the creation of more inclusive environments.

Acknowledgements

This contribution is the result of a joint reflection by the Authors. Nevertheless, the introductory section and the sections 'The built environment as a social phenomenon: inequalities between the tangible and intangible dimensions' and 'Technological and Environmental Design of Architecture and inequalities in the built environment' are to be attributed to M. L. Germanà; the sections 'Inclusivity and adaptability as mutually constitutive conditions of spatial equity', 'Methodological approach', 'Building system, system of use, and governance system: a comparison of three social housing projects', and 'Conclusions' are to be attributed to G. Madonia

References

Askar, R., Bragança, L. and Gervásio, H. (2021), "Adaptability of Buildings – A Critical Review on the Concept Evolution", in *Applied Sciences*, vol. 11, issue 10, article 4483, pp. 1-32. [Online] Available at: doi.org/10.3390/app11104483 [Accessed 10 April 2026].

Baratta, A., Conti, C. and Tatano, V. (2024), *Manifesto lessicale per l'Accessibilità Ambientale – 50 parole per progettare l'inclusione*, Anteferma, Conegliano. [Online] Available at: doi.org/10.57623/979-12-5953-087-5 [Accessed 10 April 2026].

Battaino, C., Fossati, P. and Marconi, F. (2025), "Ripensare l'abitare – Progetto e architettura per un abitare flessibile e accessibile | Rethinking housing – Design and architecture for flexible and affordable living", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 17, pp. 156-167. [Online] Available at: doi.org/10.69143/2464-9309/17102025 [Accessed 18 April 2026].

Bellini, O. E. and Martorana, F. (2025), "Strategie metaprogettuali per l'accessibilità economica alla residenzialità universitaria | Meta-design strategies for affordability in university housing", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 17, pp. 256-269. [Online] Available at: doi.org/10.69143/2464-9309/17172025 [Accessed 18 April 2026].

Cabré, E. and Andrés, A. (2018), "La Borda – A case study on the implementation of cooperative housing in Catalo-

nia", in *International Journal of Housing Policy*, vol. 18, issue 3, pp. 412-432. [Online] Available at: doi.org/10.1080/19491247.2017.1331591 [Accessed 10 April 2026].

Calcagnini, L. (2023), "La flessibilità come strategia per l'abitare al mutare delle esigenze di utenti che invecchiano | Flexibility as a Strategy for Living for the Changing Needs of Frail Users", in De Santis, M., Marzi, L., Secchi, S. and Setola, N. (eds), *Specie di spazi – Promuovere il benessere psico-fisico attraverso il progetto | Species of spaces – Fostering psycho-physical well-being by design*, Anteferma, Conegliano, pp. 142-149. [Online] Available at: anteferma.it/aob/index.php/antefermaopenbooks/catalog/view/SDS_DSA/20/150 [Accessed 10 April 2026].

Candeloro, G., Tartari, M., Varveri, R., D'Ignazio, M., Mastrolonardo, L. and Sacco, P. L. (2025), "Marginalized Living and Disabling Spaces – A Bio-Cognitive Perspective", in *Land*, vol. 14, issue 11, article 2234, pp. 1-30. [Online] Available at: doi.org/10.3390/land14112234 [Accessed 10 April 2026].

Cangelli, E. (2025), "Rigenerazione urbana e SDG – Approcci progettuali per la riduzione delle disuguaglianze urbane | Urban regeneration and SDGs – Design approaches for reducing urban inequalities", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 17, pp. 28-41. [Online] Available at: doi.org/10.69143/2464-9309/1712025 [Accessed 18 April 2026].

Chancel, L., Gómez-Carrera, R., Moshrif, R. and Piketty, T. (2026), *World Inequality Report 2026*. [Online] Available at: wir2026.wid.world/www-site/uploads/2026/01/World_Inequality_Report_2026.pdf [Accessed 10 April 2026].

Collins, H. and Pinch, T. (2009), *The Golem at Large – What You Should Know about Technology*, Cambridge University Press, Cambridge. [Online] Available at: doi.org/10.1017/CBO9780511541353 [Accessed 10 April 2026].

Di Battista, V. (2006), *Ambiente costruito – Un secondo paradigma*, Alinea, Firenze.

Germanà, M. L. (2025), "Time in Environmental Design – How to Survive on Artificial Wings", in Sayigh, A., Trombadore, A. and Calcagno, G. (eds), *Getting to Zero – Beyond Energy Transition Towards Carbon-Neutral Mediterranean Cities – Selected Papers from the World Renewable Energy Congress Med Green Forum 2024*, Springer, Cham, pp. 1-13. [Online] Available at: doi.org/10.1007/978-3-031-82323-7_1 [Accessed 10 April 2026].

Germanà, M. L. (2024), "Ethical Aspects Within the Built Heritage – Breaking the Bell Jar", in Battisti, A. and Baiani, S. (eds), *ETHICS | Endorse Technologies for Heritage Innovation, Designing Environments*, Springer, Cham, pp. 229-241. [Online] Available at: doi.org/10.1007/978-3-031-50121-0_14 [Accessed 10 April 2026].

Germanà, M. L. (2021), "Accessibilità e uso sostenibile del patrimonio architettonico – Superuser e baukultur per un rinnovamento metodologico", in Germanà, M. L. and Prescia, R. (eds), *L'accessibilità nel patrimonio architettonico – Approcci ed esperienze tra tecnologia e restauro*, Anteferma, Conegliano, pp. 20-35. [Online] Available at: hdl.handle.net/10447/490172 [Accessed 10 April 2026].

Germanà, M. L. (2018), "Patrimonio architettonico e timeless time – Per una permanenza temporanea | Architectural Heritage and timeless time – For a temporary permanence", in *Agathón | International Journal of Architecture Art and Design*, vol. 4, pp. 59-64. [Online] Available at: doi. org/10.19229/2464-9309/472018 [Accessed 10 April 2026].

Habraken, N. J. (1972), *Supports – An Alternative to Mass Housing*, Architectural Press, London.

Heidrich, O., Kamara, J., Maltese, S., Re Cecconi, F. and Dejaco, M. C. (2017), "A critical review of the developments in building adaptability", in *International Journal of Building Pathology and Adaptation*, vol. 35, issue 4, pp. 284-303. [Online] Available at: doi.org/10.1108/IJBPA-03-2017-0018 [Accessed 10 April 2026].

Lauria, A. (2017), "Progettazione ambientale e accessibilità – Note sul rapporto persona-ambiente e sulle strategie di design | Environmental design and accessibility – Notes on the person-environment relationship and on design strategies", in *Techne | Journal of Technology for Architecture and Environment*, vol. 13, pp. 55-62. [Online] Available at: doi.org/10.13128/Techne-21134 [Accessed 10 April 2026].

Lee, R. (1976), *Building Maintenance Management*, Crosby Lockwood Staples, London.

Mouratidis, K. (2018), "Built environment and social well-being – How does urban form affect social life and personal relationships?", in *Cities*, vol. 74, pp. 7-20. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.cities.2017.10.020 [Accessed 10 April 2026].

Nielsen, C. H. (2024), "Typologization of exclusionary design – An exploration of design interventions excluding unhoused people from urban public spaces", in *Design Studies*, vol. 93-94, article 101264, pp. 1-24. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.destud.2024.101264 [Accessed 10 April 2026].

O'Brien, D., Carrasco, S. and Dovey, K. (2020), "Incremental housing – Harnessing informality at Villa Verde", in *Archnet-IJAR | International Journal of Architectural Research*, vol. 14, issue 3, pp. 345-358. [Online] Available at: doi.org/10.1108/ARCH-10-2019-0237 [Accessed 10 April 2026].

Oppido, S., Ragozino, S. and Esposito De Vita, G. (2023), "Peripheral, Marginal, or Non-Core Areas? – Setting the Context to Deal with Territorial Inequalities through a Systematic Literature Review", in *Sustainability*, vol. 15, issue 13, article 10401, pp. 1-36. [Online] Available at: doi.org/10.3390/su151310401 [Accessed 10 April 2026].

Pacey, A. (1983), *The culture of technology*, MIT Press, Cambridge (MA).

Pathiraja, M. (2025), "Robustness as a Design Strategy – Navigating the Social Complexities of Technology in Building Production", in *Buildings*, vol. 15, issue 19, article 3586, pp. 1-17. [Online] Available at: doi.org/10.3390/buildings15193586 [Accessed 10 April 2026].

Pinch, T. J. and Bijker, W. E. (1984), "The Social Construction of Facts and Artefacts – Or How the Sociology of Science and the Sociology of Technology might Benefit Each Other", in *Social Studies of Science*, vol. 14, issue 3, pp. 399-441. [Online] Available at: doi.org/10.1177/030631284014003004 [Accessed 10 April 2026].

Privitera, F. (2016), "Elemental – Da Quinta Monroy a Conjunto abitacional Violeta Parra", in *Firenze Architettura*, vol. 19, issue 1, pp. 52-59. [Online] Available at: doi.org/10.13128/FiAr-17615 [Accessed 10 April 2026].

Pulighe, G., Bonati, G., Colangeli, M., Morese, M. M., Traverso, L., Lupia, F., Khawaja, C., Janssen, R. and Fava, F. (2019), "Ongoing and emerging issues for sustainable bioenergy production on marginal lands in the Mediterranean regions", in *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 103, pp. 58-70. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.rser.2018.12.043 [Accessed 10 April 2026].

Ricci, L., Poli, I. and Marino, M. (2025), "Welfare urbano e rigenerazione – Sostenibilità e inclusione sociale per il raggiungimento degli SDG | Urban welfare and regeneration – Sustainability and social inclusion for achieving the SDGs", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 17, pp. 94-107. [Online] Available at: doi.org/10.69143/2464-9309/1752025 [Accessed 18 April 2026].

Schmidt III, R., Eguchi, T., Austin, S. and Gibb, A. (2010), "What is the meaning of adaptability in the building industry", in Chica, J. A., Elguezabal, P., Meno, S. and Amundarain, A. (eds), *Open and sustainable building – Proceedings of the 16th International Conference on Open Building Implementation*, *Bilbao, Spain, May 17-19, 2010*, TECNALIA, Bilbao, pp. 233-242. [Online] Available at: irbnet.de/daten/iconda/CIB17993.pdf [Accessed 10 April 2026].

Schneider, T. and Till, J. (2007), *Flexible Housing*, Architectural Press, Oxford.

Sgobbo, A. and Moccia, F. D. (2016), "Synergetic Temporary Use for the Enhancement of Historic Centers – The Pilot Project for the Naples Waterfront", in *Techne | Journal of Technology for Architecture and Environment*, vol. 12, pp. 253-260. [Online] Available at: doi.org/10.13128/Techne-19360 [Accessed 10 April 2026].

Shahi, S., Esnaashary Esfahani, M., Bachmann, C. and Haas, C. (2020), "A definition framework for building adaptation projects", in *Sustainable Cities and Society*, vol. 63, article 102345, pp. 1-15. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.scs.2020.102345 [Accessed 10 April 2026].

Storper, M. (2024), "Le cinque tipologie di disuguaglianze urbane-spaziali – Casi, effetti, e prospettive di miglioramento", in Vitale, T. (ed.), *Città divario – Oltre le disuguaglianze urbane*, Fondazione Giangiacomo Feltrinelli, Milano, pp. 19-34. [Online] Available at: fondazionefeltrinelli.it/scopri/citta-divario/ [Accessed 10 April 2026].

Trzcińska, M. (2021), "Add, Transform, and Utilize – Possibilities of Applying Druot, Lacaton, and Vassal's Modernization Strategies and Solutions in Polish Large-Panel Housing Estates", in *Land*, vol. 10, issue 12, article 1308, pp. 1-20. [Online] Available at: doi.org/10.3390/land10121308 [Accessed 10 April 2026].

Tsoka, S. and Tsikaloudaki, K. (2025), "Design for Circularity, Design for Adaptability, Design for Disassembly", in Bragança, L., Griffiths, P., Askar, R., Salles, A., Ungureanu, V., Tsikaloudaki, K., Bajare, D., Zsembinszki, G. and Cvetkovska, M. (eds), *Circular Economy Design and Management in the Built Environment – A Critical Review of the State of the Art*, Springer, Cham, pp. 257-272. [Online] Available at: doi.org/10.1007/978-3-031-73490-8_9 [Accessed 10 April 2026].

UN – General Assembly (2015), *Transforming our World – The 2030 Agenda for Sustainable Development*, document A/RES/70/1. [Online] Available at: sdgs.un.org/2030agenda [Accessed 20 April 2026].

Valenti, A., Scalisi, F., Sposito, C., Colaci, D. F. and Moor, G. (2025), "Design, tecnologia e povertà – Dispositivi per il progetto di architetture, oggetti e società | Design, technology, and poverty – Devices for the design of architecture, objects, and society", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 17, pp. 42-67. [Online] Available at: doi.org/10.69143/2464-9309/1722025 [Accessed 10 April 2026].

van Ellen, L. A., Bridgens, B. N., Burford, N. and Heidrich, O. (2021), "Rhythmic Buildings – A framework for sustainable adaptable architecture", in *Building and Environment*, vol. 203, article 108068, pp. 1-11. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108068 [Accessed 10 April 2026].

Varghese, C. and Kumar, S. S. (2022), "Marginality – A Critical Review of the Concept", in *Review of Development and Change*, vol. 27, issue 1, pp. 23-41. [Online] Available at: doi.org/10.1177/09722661221096681 [Accessed 10 April 2026].

Vitale, T. (2024), "Nelle città e nelle aree metropolitane, la disuguaglianza estrema non è un destino", in Vitale, T. (ed.), *Città divario – Oltre le disuguaglianze urbane*, Fondazione Giangiacomo Feltrinelli, Milano, pp. 7-17. [Online] Available at: fondazionefeltrinelli.it/scopri/citta-divario/ [Accessed 10 April 2026].

Xu, Y., Tang, Y. and Zhang, L. (2024), "Exploring the connotation of 'Local Community' in ICOMOS discourse – A textual analysis based on authoritative documents", in *Heritage Sciences*, vol. 12, article 116, pp. 1-24. [Online] Available at: doi.org/10.1186/s40494-024-01222-4 [Accessed 10 April 2026].

ARCHITECTURE
Research & Experimentation

AGATHÓN – International Journal of Architecture, Art and Design | n. 19 | 2026 | pp. 82-93
ISSN print: 2464-9309 – ISSN online: 2532-683X | doi.org/10.69143/2464-9309/1952026

Article Info

Received 10 March 2026
Revised 23 April 2026
Accepted 25 April 2026
Published 30 June 2026

ALFABETIZZAZIONE SUL CARBONIO E INFRASTRUTTURE ECOSISTEMICHE
Metodo GIS-R per la valutazione climatica

CARBON LITERACY AND ECOSYSTEM INFRASTRUCTURES
A GIS-R method for climate assessment

Francesca Moraci, Alessandra Barresi, Pietro Bova, Francesco Trimboli

Abstract

Il contributo propone una procedura GIS-R, a codice aperto e replicabile, per stimare lo stock di carbonio e il potenziale di assorbimento nel bacino della Fiumara Calopinace (Reggio Calabria), area di sperimentazione del PP 4.6.1 – Tech4You. Muovendo dalla classificazione ecosistemica di Carta Natura, ricondotta alle categorie dell'IPCC, il metodo traduce dati ecologici locali in metriche biofisiche comparabili, utili a supportare la pianificazione urbanistica responsiva al clima. Il carbonio è considerato non solo come indicatore climatico ma anche come infrastruttura cognitiva capace di connettere servizi ecosistemici, usi del suolo e scelte di Piano. Il modello consente di confrontare lo stato ecosistemico attuale, il quadro urbanistico vigente e gli scenari di trasformazione, offrendo una base conoscitiva per valutazioni ex ante ed ex post e per il contributo agli SDG 9 e 11.

This paper proposes an open-source and replicable GIS-R procedure for estimating carbon stock and sequestration potential in the Fiumara Calopinace basin (Reggio Calabria), the experimental area of PP 4.6.1 – Tech4You. Starting from the ecosystem classification of Carta Natura, reclassified according to IPCC categories, the method translates local ecological data into comparable biophysical metrics that support climate-responsive urban planning. Carbon is considered not only as a climate indicator but also as a cognitive infrastructure capable of connecting ecosystem services, land uses, and planning choices. The model enables comparison between the current ecosystem condition, the statutory planning framework, and transformation scenarios, providing a knowledge base for ex ante and ex post assessments and for contributions to SDGs 9 and 11.

Keywords

gis-r, pianificazione urbanistica climatica, servizi ecosistemici, crediti natura, alfabetizzazione sul carbonio

gis-r, climate-responsive urban planning, ecosystem services, nature credits, carbon literacy

Francesca Moraci, Architect and PhD, is a Full Professor of Urban Planning at the Department of Architecture and Design of the 'Mediterranea' University of Reggio Calabria (Italy). She has coordinated several European and national research projects funded through competitive calls. E-mail: fmoraci@unirc.it

Alessandra Barresi, Architect and PhD, is an Associate Professor of Urban Planning at the Department of Architecture and Design of the 'Mediterranea' University of Reggio Calabria (Italy). Specialised in planning techniques for metropolitan cities, she has carried out research activities in European and national projects. E-mail: alessandra.barresi@unirc.it

Pietro Bova, Architect and PhD, is a Research Fellow at the 'Mediterranea' University of Reggio Calabria (Italy), within Action 0 of Pilot Project 4.6.1 – Goal 4.6 of the Tech4You Innovation Ecosystem. His research focuses on climate-change issues, including investment analysis, impact assessment, and support for decision-making processes. E-mail: pietro.bova@unirc.it

Francesco Trimboli, Architect and PhD, is a Research Fellow at the 'Mediterranea' University of Reggio Calabria (Italy), within Action 6 of Pilot Project 4.6.1 – Goal 4.6 of the Tech4You Innovation Ecosystem. His research focuses on the use of GIS-R methodologies and digital tools for territorial analysis, climate assessment, and decision-process support. E-mail: francesco.trimboli@unirc.it



L'accelerazione dei cambiamenti climatici, il progressivo degrado degli ecosistemi e l'accentuarsi delle disuguaglianze socioeconomiche hanno messo in discussione la capacità delle discipline del progetto e della pianificazione di interpretare e governare i processi di trasformazione territoriale e urbana. In questo quadro gli Obiettivi di Sviluppo Sostenibile (SDG) promossi dalle Nazioni Unite (UN, 2015) hanno progressivamente assunto il ruolo di riferimento strategico per orientare le traiettorie di sviluppo verso modelli capaci di coniugare sostenibilità ambientale, innovazione tecnologica ed equità sociale (Ricci, Poli and Marino, 2025). Numerosi studi hanno evidenziato come tali obiettivi non operino in modo indipendente ma siano caratterizzati da complesse relazioni di sinergie e compromessi che richiedono approcci integrati capaci di valutare gli effetti sistemici delle politiche territoriali (Randers et alii, 2019).

Tra questi obiettivi l'SDG 9 (Industria, innovazione e infrastruttura) e l'SDG 11 (Città e comunità sostenibili) assumono una particolare rilevanza nel dibattito contemporaneo sul futuro dell'ambiente costruito: da un lato infrastrutture, tecnologie e sistemi produttivi costituiscono l'ossatura materiale attraverso cui si organizzano lo sviluppo economico e le trasformazioni territoriali, dall'altro la distribuzione spaziale delle risorse ambientali, dei servizi ecosistemici e delle esposizioni ai rischi climatici riflette – e talvolta amplifica – le disuguaglianze socio-territoriali esistenti (Barbier and Burgess, 2019; Pham-Truffert et alii, 2020).

Le città emergono come contesti privilegiati in cui le transizioni ambientali, tecnologiche e sociali si manifestano in modo particolarmente evidente. Gli ambienti urbani concentrano infatti la maggior parte della popolazione mondiale e delle attività economiche, ma al tempo stesso rappresentano i principali generatori di pressioni ecologiche, tra cui il consumo di suolo, l'uso intensivo delle risorse e le emissioni climalteranti (UN-Habitat, 2022). Parallelamente la configurazione spaziale dei sistemi determina spesso una distribuzione diseguale dei benefici ambientali e dei rischi climatici, contribuendo alla formazione di vere e proprie forme di disuguaglianza ambientale.

Affrontare tali sfide richiede lo sviluppo di nuovi quadri interpretativi e operativi capaci di integrare conoscenze ecosistemiche, la modellazione spaziale e le pratiche progettuali. In questo senso la crescente disponibilità di dati, ambienti di calcolo e strumenti di modellazione geospaziale sta favorendo l'affermazione di approcci informati dai dati per la pianificazione urbanistica, nei quali i processi ambientali possono essere quantificati, simulati e integrati nei processi decisionali. Tale prospettiva si inserisce in una lettura dei territori come sistemi dinamici multilivello nei quali le relazioni tra componenti ecologiche, infrastrutturali e socio-territoriali si configurano come reti complesse di interdipendenza (Gausa, 2024).

In tale contesto si colloca il Programma di Ricerca e Innovazione Tech4You[1], finanziato nell'ambito del Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza, che mira a costruire un ecosistema dell'innovazione orientato allo sviluppo di modelli, tecnologie e strumenti per l'adattamento ai cambiamenti climatici nelle regioni dell'Italia meridionale. All'interno di questo quadro il Progetto Pilota 4.6.1[2] (Fig. 1) sviluppa approcci integrati per la riduzione della vulnerabilità climatica attraverso la costruzione di modelli di pianificazione informata dai dati, capaci di integrare analisi ecosistemiche, simulazioni climatiche e sistemi digitali (e fisici) di supporto decisionale.

In questo scenario i servizi ecosistemici e i modelli di contabilizzazione del carbonio assumono un ruolo rilevante come metriche operative in grado di tradurre i processi ecologici in indicatori misurabili e comparabili. In particolare il carbonio si configura come parametro strategico nella lettura e nella gestione dei territori capace di mettere in relazione dinamiche ecologiche, trasformazioni d'uso del suolo e politiche di mitigazione dei cambiamenti climatici (Domke et alii, 2019).

Tuttavia, nonostante la crescente produzione scientifica in questo ambito, permane una significativa distanza tra la conoscenza ecologica e la sua effettiva integrazione nei processi di pianificazione. Molti studi forniscono infatti valutazioni ecologiche dettagliate ma difficilmente traducibili in strumenti operativi, mentre i dispositivi pianificatori tradizionali risultano spesso privi di indicatori ecosistemici robusti capaci di supportare valutazioni ex-ante ed ex-post delle trasformazioni.

Permane inoltre una duplice criticità: da un lato numerosi studi sulla contabilizzazione del carbonio sono stati sviluppati in ambiti forestali, agricoli o ambientali, senza una reale traduzione nei processi urbanistici; dall'altro molte pratiche di pianificazione climatica operano ancora senza metriche biofisiche standardizzate e confrontabili. A ciò si aggiunge la limitata disponibilità di workflow aperti e replicabili, costruiti per confrontare stato di fatto, quadro normativo vigente e scenari di trasformazione urbana. A partire da questo presupposto teorico il contributo propone un flusso operativo integrato (Longo et alii, 2024) GIS-R, a codice aperto e replicabile, finalizzato alla stima dello stock di carbonio e del potenziale di assorbimento condotto a partire dalla classificazione ecosistemica derivata da Carta Natura (Paone et alii, 2023) che descrive lo stato biofisico attuale del territorio. Tuttavia tale rappresentazione non coincide necessariamente con le destinazioni d'uso previste dagli strumenti urbanistici vigenti che costituiscono il quadro normativo entro cui si collocano le trasformazioni territoriali. Pertanto l'obiettivo del paper è verificare se e in quale misura una procedura geospaziale integrata GIS-R, basata sull'adattamento locale tra classificazioni ecosistemiche e categorie elaborate dall'Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), possa costituire uno strumento operativo per la pianificazione urbanistica responsiva al clima. La domanda di ricerca riguarda la possibilità di trasformare dati ecologici territoriali in indicatori comparabili, utili alla valutazione ex ante ed ex post di scenari di Piano.

Il contributo originale del lavoro risiede in tre aspetti: nella costruzione di una matrice di raccordo operativo tra Carta Natura e classi internazionali di contabilizzazione del carbonio; nella definizione di un workflow a codice aperto replicabile; nell'orientamento esplicito del modello al supporto delle decisioni urbanistiche e alla valutazione di scenari trasformativi. Il modello proposto intende contribuire al dibattito scientifico sul rapporto tra innovazione metodologica, pianificazione urbanistica e adattamento climatico, offrendo una procedura applicabile anche in altri contesti mediterranei caratterizzati da fragilità ecosistemica, pressione insediativa e necessità di strumenti decisionali basati sull'evidenza.

Alfabetizzazione sul carbonio per il progetto: il carbonio come infrastruttura cognitiva per la pianificazione responsiva al clima | Il carbonio è stato prevalentemente utilizzato come indicatore per la quantificazione delle emissioni e per il monitoraggio degli obiettivi di mitigazione climatica stabiliti dagli accordi internazionali, in particolare nell'ambito della Convenzione Quadro delle Nazioni Unite sui Cambiamenti Climatici (UN, 1992) e degli inventari nazionali delle emissioni (Domke et alii, 2019). Negli ultimi anni la letteratura scientifica ha tuttavia progressivamente ampliato questa prospettiva, evidenziando come il carbonio possa essere interpretato non soltanto come variabile climatica ma anche come parametro territoriale capace di restituire informazioni sulla struttura ecologica, sulle dinamiche di uso del suolo e sul funzionamento degli ecosistemi (Pan et alii, 2011; Keith et alii, 2024).

Parallelamente il crescente interesse verso i servizi ecosistemici ha contribuito a rafforzare questa convinzione: la capacità degli ecosistemi terrestri di sequestrare e immagazzinare carbonio rappresenta uno dei principali servizi di regolazione riconosciuti dalla letteratura e dalle principali classificazioni internazionali (Millennium Ecosystem Assessment, 2005; Potschin et alii, 2016). La quantificazione dello stock e dei flussi di carbonio consente quindi di tradurre il funzionamento degli ecosistemi in metriche biofisiche misurabili, utili a supportare processi di pianificazione territoriale orientati alla sostenibilità ma, nonostante questi progressi, l'integrazione delle metriche del carbonio nei processi di pianificazione rimane limitata.

Infatti in molti casi le analisi sono sviluppate in ambiti disciplinari separati e non entrano nei dispositivi operativi della pianificazione urbanistica. In questo contesto il concetto di 'alfabetizzazione sul carbonio', originariamente sviluppato nel campo delle politiche climatiche può essere reinterpretato come 'alfabetizzazione sul carbonio per il progetto', ossia come insieme di competenze, strumenti e metodi in grado di integrare le metriche del carbonio nei processi di analisi, valutazione e decisione territoriale.

Interpretata in questa prospettiva la 'alfabetizzazione sul carbonio' non si limita alla conoscenza dei processi climatici, ma configura il carbonio come parametro operativo capace di orientare strategie di rigenerazione urbana, progettazione delle infrastrutture verdi e gestione sostenibile del territorio. Questa prospettiva è particolarmente rilevante nel contesto delle politiche europee e internazionali orientate alla transizione ecologica; l'attenzione crescente verso strumenti di contabilizzazione del carbonio, sistemi di certificazione ambientale e meccanismi di mercato legati ai servizi ecosistemici evidenzia la necessità di disporre di dati territoriali affidabili e comparabili, capaci di rendere misurabili i benefici ambientali generati dagli ecosistemi (Zhao and Shaw, 2025).

Numerosi studi hanno infatti evidenziato che la distribuzione dei servizi ecosistemici nei territori urbani e periurbani non è omogenea ma spesso riflette dinamiche socio-spaziali che influenzano l'accesso ai benefici ambientali e alle infrastrutture ecologiche. In questo senso la lettura territoriale delle prestazioni ecosistemiche può contribuire a evidenziare relazioni tra qualità ambientale, modelli urbani e giustizia spaziale (Fiorini et alii, 2025). La mappatura dello stock di carbonio e della capacità ecosistemica dei territori può quindi contribuire a evi-

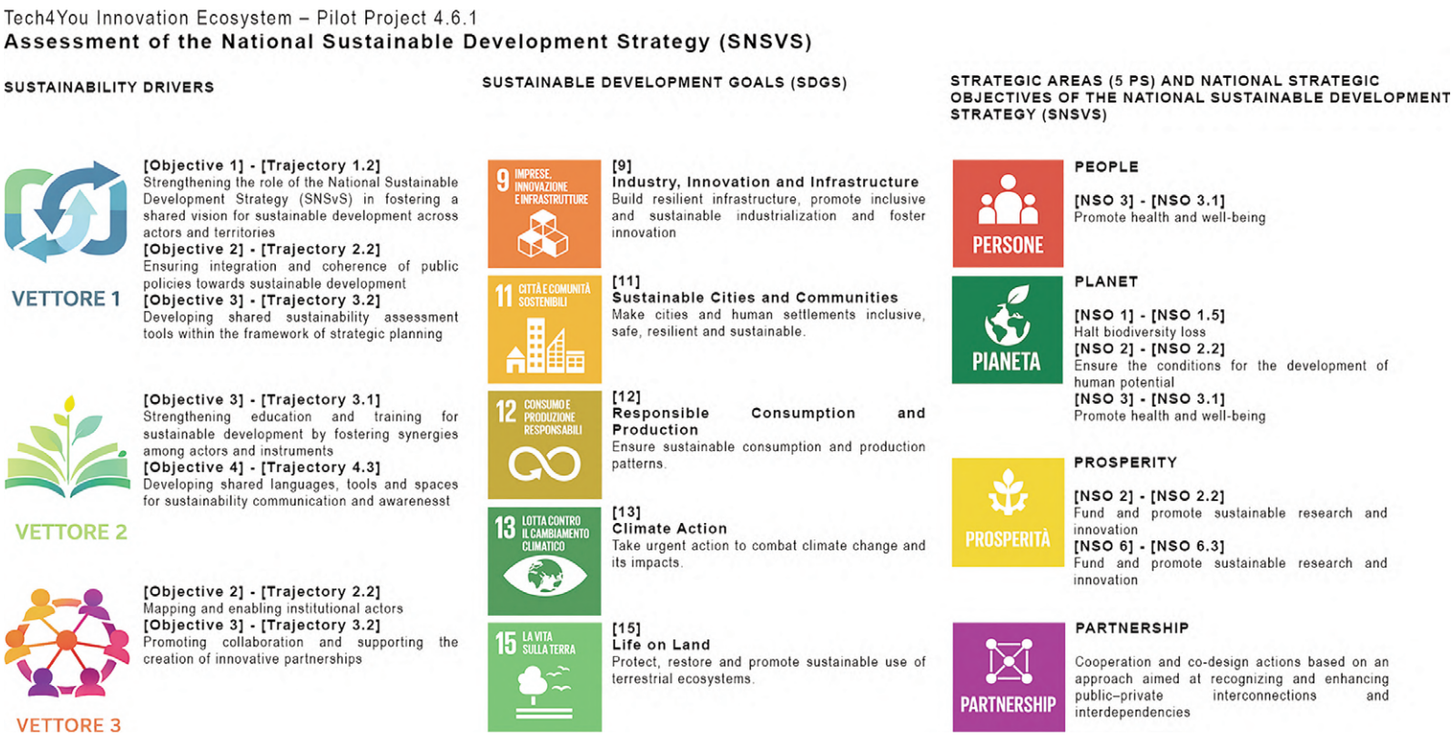


Fig. 1 | Reference framework linking the Sustainability Vectors of the SNSvS, the SDGs, and the Strategic Areas (5Ps) of the National Sustainable Development Strategy (credit: the Authors, 2026).

denziare tali asimmetrie, fornendo strumenti conoscitivi utili per orientare politiche di riequilibrio territoriale e strategie di rigenerazione ecologica. Questa alfabetizzazione può essere interpretata come dispositivo concettuale capace di connettere diverse dimensioni della sostenibilità territoriale, contribuendo a costruire approcci progettuali transcalari, nei quali le strategie locali di trasformazione territoriale si allineano con gli obiettivi globali dell'Agenda 2030 e con le logiche delle soluzioni basate sulla natura (Ingaramo et alii, 2023).

Contabilizzazione del carbonio, servizi ecosistemici e governance territoriale | Tradizionalmente i modelli di contabilizzazione del carbonio sono stati sviluppati principalmente nell'ambito delle politiche climatiche e della rendicontazione delle emissioni di gas serra. Le linee guida elaborate dall'IPCC (Domke et alii, 2019) rappresentano oggi il riferimento metodologico internazionale per la stima degli stock e dei flussi di carbonio associati agli usi del suolo, alla gestione forestale e alle attività agricole nell'ambito del settore AFOLU / LULUCF[3]. Tali metodologie sono utilizzate dagli Stati membri della Convenzione Quadro delle Nazioni Unite sui cambiamenti climatici per la redazione degli inventari nazionali delle emissioni e degli assorbimenti di carbonio.

Questa contabilizzazione ha tuttavia progressivamente ampliato il proprio campo di applicazione, estendendosi oltre la dimensione della rendicontazione climatica e assumendo un ruolo crescente nei processi di governance territoriale e nella definizione delle politiche ambientali. La possibilità di quantificare e rappresentare spazialmente lo stock di carbonio associato ai diversi ecosistemi consente di individuare aree strategiche per la conservazione, la rinaturalizzazione e la gestione sostenibile del territorio, trasformando il carbonio in un indicatore territoriale utile a orientare le scelte di pianificazione.

In diversi contesti territoriali europei tali approcci sono stati utilizzati per interpretare le relazioni tra dinamiche di urbanizzazione, innovazione rurale e servizi ecosistemici, evidenziando il ruolo delle infrastrutture ecologiche nella definizione di nuove strategie territoriali integrate (Lombardini, Pilogallo and Tucci, 2023). La quantificazione dello stock di carbonio diventa quindi una modalità operativa per tradurre la capacità ecosistemica dei territori in indicatori biofisici utili per la pianificazione ambientale e territoriale; tale approccio consente di evidenziare le relazioni tra struttura ecosistemica, usi del suolo e dinamiche insediative.

In questa prospettiva vanno considerati anche nuovi strumenti per la valorizzazione economica dei servizi ecosistemici ma affinché questi meccanismi possano essere applicati in modo efficace e credibile è tuttavia necessario disporre di basi conoscitive, fondate su dati verificabili, replicabili e coerenti con gli standard internazionali di rendicontazione ambientale. In questa cornice rientrano dunque la standardizzazione delle metriche ambientali e la costruzione di sistemi informativi interoperabili, i quali rappresentano condizioni fondamentali per rendere confrontabili i dati territoriali e supportare processi decisionali basati su evidenze quantitative (Bologna, Ghersi and Melli, 2023). La quantificazione dello stock di carbonio e dei flussi di assorbimento rappresenta pertanto un passaggio cruciale per garantire la trasparenza e la credibilità di tali sistemi, evitando fenomeni di sovrastima o di doppia contabilizzazione dei benefici ecosistemici.

Un tema centrale è il principio di addizionalità, ovvero la capacità di dimostrare che i benefici ecosistemici generati da un determinato intervento non si sarebbero verificati in assenza di tale azione. Allo stesso tempo diventa necessario considerare il problema della permanenza degli assorbimenti di carbonio nel tempo e il rischio di spostamento delle pressioni ambientali verso altri territori.

Un ulteriore elemento di rilievo riguarda la relazione tra la contabilizzazione del carbonio e le disuguaglianze ambientali: la distribuzione dei servizi ecosistemici e delle infrastrutture ecologiche all'interno dei territori non è infatti uniforme, ma riflette spesso processi storici di sviluppo urbano e di organizzazione socioeconomica dello spazio. Alcune aree urbane o periurbane possono risultare significativamente carenti di spazi verdi e infrastrutture ecologiche, esponendo le popolazioni residenti a condizioni ambientali più critiche, come l'intensificazione delle isole di calore urbane o una maggiore vulnerabilità agli eventi climatici estremi.

Approccio metodologico e modello di valutazione del carbonio | Il metodo è stato sperimentato nel bacino della Fiumara Calopinace (Reggio Calabria) in un contesto mediterraneo caratterizzato da elevata fragilità ecosistemica e da forti pressioni antropiche. L'obiettivo era costruire un modello analitico capace di quantificare le prestazioni ecosistemiche del territorio in termini di capacità di sequestro del carbonio, traducendo l'informazione ecologica qualitativa derivante dai dataset ambientali in indicatori biofisici misurabili e confrontabili.

Dal punto di vista operativo il protocollo metodologico è stato articolato in sei fasi sequenziali e replicabili: 1) acquisizione e preparazione dei dati territoriali; 2) riclassificazione ecosistemica e costruzione della matrice di raccordo con le categorie IPCC; 3) attribuzione dei coefficienti medi di stock di carbonio; 4) modellazione geospaziale su griglia regolare; 5) simulazione temporale dell'accrescimento potenziale; 6) interpretazione dei risultati a supporto della pianificazione urbanistica. Tale articolazione consente la ripetizione dello studio in

contesti differenti, a condizione che siano disponibili dati territoriali minimi omogenei e georiferiti.

Il punto di partenza dell'analisi è la Carta Natura della Regione Calabria, un set di dati vettoriale che descrive la distribuzione degli ecosistemi attraverso una classificazione ecologica articolata. In particolare l'analisi è stata condotta utilizzando il livello poligonale (clip) relativo all'area oggetto della sperimentazione del progetto pilota all'interno del quale sono state identificate 40 categorie ecologiche locali. Tali categorie costituiscono un repertorio descrittivo estremamente dettagliato delle tipologie ecosistemiche presenti nel territorio e rappresentano la base conoscitiva su cui è stato costruito il modello di valutazione del carbonio (Fig. 2).

I dati minimi richiesti per la replicabilità del modello sono: a) cartografia ecosistemica o uso / copertura del suolo in formato vettoriale o raster ad adeguata risoluzione; b) perimetro dell'area di studio; c) sistema di riferimento metrico coerente; d) coefficienti di stock di carbonio ricavati da letteratura o inventari ufficiali; e) eventuali strumenti urbanistici vigenti per analisi comparative tra stato di fatto e scenari di Piano. L'elevato livello di dettaglio della legenda della Carta Natura rendeva difficile l'attribuzione diretta dei valori di stock alle singole categorie; al fine di superare tale criticità è stata applicata una riclassificazione funzionale, fondata sulla costruzione di una tabella di corrispondenza tra le categorie ecologiche locali e le classi di uso del suolo previste dalle linee guida dell'IPCC (Domke et alii, 2019) che rappresentano lo standard internazionale per la stima degli stock e dei flussi di carbonio negli ecosistemi terrestri e costituiscono il riferimento metodologico utilizzato dagli Stati per la redazione degli inventari nazionali delle emissioni e degli assorbimenti di carbonio.

Il processo di riclassificazione è stato condotto sulla base di tre criteri principali: 1) la struttura della vegetazione dominante; 2) la tipologia d'uso o di gestione del suolo; 3) il contenuto medio di biomassa e di carbonio organico del suolo associato ai diversi ecosistemi. Attraverso questa procedura sono stati individuati 7 gruppi ecosistemici (Tab. 1) funzionali, che rappresentano un adattamento locale delle categorie IPCC e consentono di collegare la classificazione ecologica della Carta Natura ai modelli internazionali di contabilizzazione del carbonio. La procedura per la costruzione della matrice costituisce uno degli elementi centrali del metodo poiché consente di tradurre tassonomie ecologiche locali in classi comparabili a scala internazionale, preservando al contempo il dettaglio territoriale necessario alle applicazioni urbanistiche.

Definita la struttura di riclassificazione è stato possibile procedere all'attribuzione dei valori medi di stock di carbonio agli ecosistemi attraverso una revisione sistematica della letteratura scientifica internazionale e nazionale relativa alla stima della biomassa e del carbonio organico negli ecosistemi terrestri. Le principali fonti utilizzate includono le citate linee guida dell'IPCC per i settori AFOLU e LULUCF, l'Inventario Nazionale delle Foreste e dei Serbatoi Forestali di Carbonio[4] (INFC) e diversi studi dedicati alla quantificazione del carbonio negli ecosistemi mediterranei. A partire da queste fonti sono stati individuati intervalli di riferimento dello stock di carbonio, espresso in tonnellate per ettaro (tC/ha), per ciascun gruppo ecosistemico; per ridurre la variabilità tra i diversi contesti di studio è stato adottato un valore medio rappresentativo per ogni categoria, calcolato come media degli intervalli riportati nella letteratura scientifica. L'approccio adottato è coerente con i livelli metodologici Tier 1 e Tier 2 previsti dalle linee guida IPCC e basati sull'utilizzo di coefficienti medi derivati dalla letteratura e dagli inventari forestali nazionali (Tab. 2). L'utilizzo di coefficienti medi rende il metodo immediatamente applicabile anche in assenza di campagne di misura dirette, configurandosi come soluzione appropriata per analisi preliminari, screening territoriali e valutazioni comparative tra scenari.

Una volta attribuiti i valori medi di stock di carbonio agli ecosistemi è stata avviata la fase di modellazione geospaziale per la costruzione di una superficie continua della densità[5] (Fig. 3). Questa procedura ha consentito di costruire mappe continue della densità del carbonio, utili a rappresentare la distribuzione spaziale della capacità ecosistemica del territorio. Le elaborazioni sono state realizzate, considerati i relativi intervalli di riferimento (Tab. 3), attraverso l'integrazione tra QGIS e l'ambiente di calcolo RStudio, garantendo la tracciabilità delle operazioni e la replicabilità dell'intero flusso operativo analitico (Fig. 4). L'uso di una doppia risoluzione spaziale permette di confrontare scale differenti di lettura[6]: la griglia a 400 m risulta più adatta a interpretazioni strategiche di area vasta, mentre quella a 200 m consente letture più puntuali utili alla scala urbana e progettuale. Il modello consente di stimare lo stock futuro di carbonio a partire dallo stock iniziale e da un tasso medio annuo di accrescimento specifico per ciascun gruppo ecosistemico.

Successivamente sono stati considerati tre orizzonti temporali di simulazione – 10, 20 e 30 anni – per valutare l'evoluzione potenziale del sistema ecosistemico nel medio e nel lungo periodo. A ciascun gruppo è stato assegnato un valore medio rappresentativo dello stock (tC/ha), calcolato come media aritmetica dell'intervallo di riferimento, da cui è stato successivamente derivato un tasso annuo medio di accrescimento (r) utilizzato per stimare il potenziale di assorbimento (Fig. 5).

L'assorbimento potenziale è stato espresso secondo la relazione $A_i = S_i \times r_i$, dove 'A_i' rappresenta l'assorbimento medio per unità di superficie (tC/ha/anno), 'S_i' lo stock medio di riferimento e 'r_i' il tasso di accrescimento specifico per ecosistema (Zomer era lii, 2016). Questi valori derivano da un adattamento funzionale dei parametri proposti dall'IPCC (Domke et alii, 2019) e dai principali studi sulla produttività netta e sull'accumulo di carbonio in ecosistemi mediterranei (Marchetti et alii, 2012; Fernandes et alii, 2020; Funes et alii, 2022). Tale impostazione consente di collegare direttamente

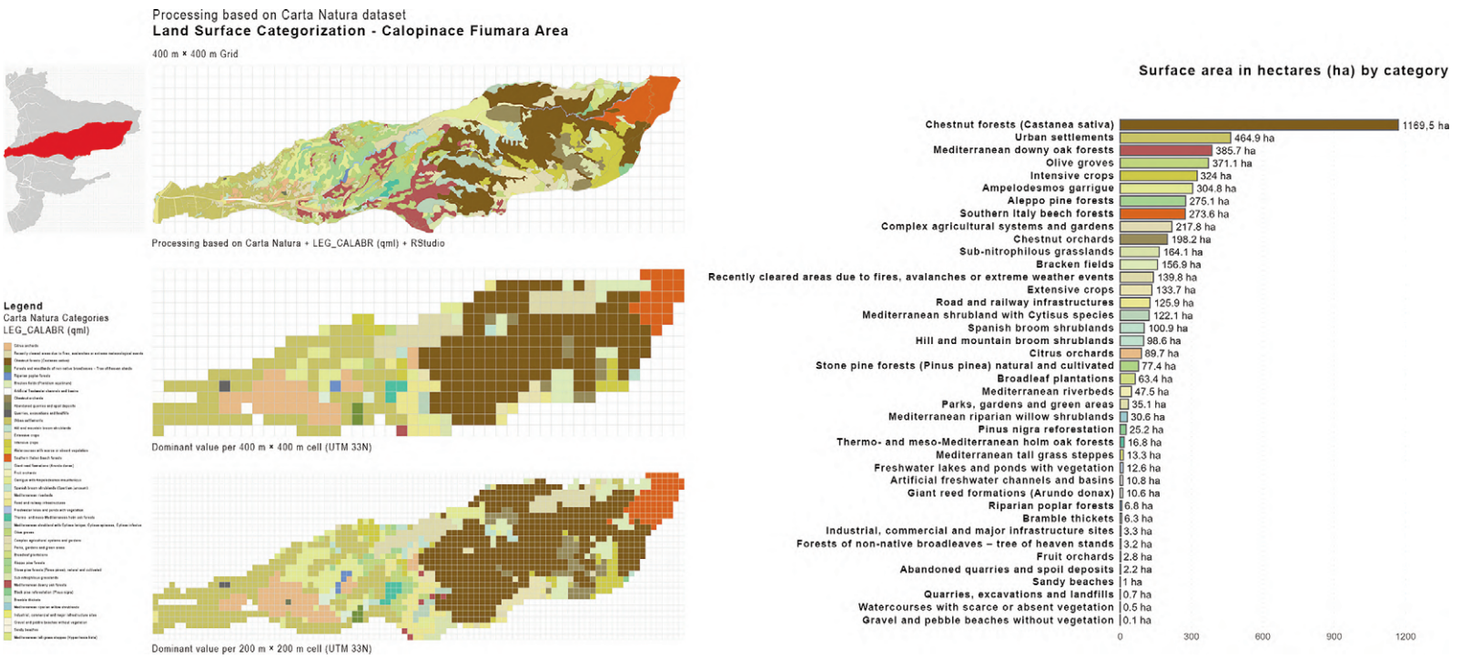


Fig. 2 | Ecosystem classification of the Calopinace Torrent area derived from Carta Natura and spatial discretisation through regular grids of 400 × 400 m and 200 × 200 m (credit: the Authors, 2026).

No.	Ecosystem group	Scientific description	Carbon stock range	IPCC category (2019)
1	Temperate and Mediterranean forests	Deciduous, evergreen or mixed forests, whether natural or reforested; includes chestnut, beech, oak, holm oak and Mediterranean pine forests	100-220 tC/ha	Forest Land
2	Mediterranean shrublands and maquis	Secondary formations dominated by shrubs, including maquis, garrigue, broom formations and scrublands	70-110 tC/ha	Grassland / shrubland
3	Mediterranean grasslands and steppes	Perennial or seasonal herbaceous systems, often located on arid or disturbed substrates	30-50 tC/ha	Grassland
4	Tree-based agroecosystems	Permanent tree crops, including olive groves, citrus orchards, fruit orchards and chestnut groves	35-90 tC/ha	Cropland (tree-based)
5	Herbaceous crops and agricultural mosaics	Arable land, market gardens and complex agricultural systems dominated by annual herbaceous species	20-40 tC/ha	Cropland (herbaceous)
6	Wetlands and riparian ecosystems	Hygrophilous and fluvial ecosystems with poplar, willow, reed beds and riparian vegetation	80-170 tC/ha	Wetlands / Forest Land (riparian)
7	Anthropised, extractive and coastal areas	Built-up areas, infrastructure, quarries, landfills, beaches and artificial surfaces	< 10 tC/ha	Settlements / Other Land

Tab. 1 | Reclassification scheme between local ecosystem categories and IPCC land-use classes (source: Domke et alii, 2019; adapted by the Authors, 2026).

Next page

Tab. 2 | Crosswalk between Carta Natura ecosystem classes (LEG_CALABR), functional ecosystem groups, and IPCC land-use classes used to estimate carbon stock in the Calopinace basin (source: Domke et alii, 2019; adapted by the Authors, 2026).

la struttura ecosistemica alla dinamica dei flussi di carbonio, traducendo la tipologia vegetazionale in un parametro biofisico di assorbimento. Le simulazioni evidenziano come la capacità di sequestro del carbonio varia in modo significativo in funzione della struttura ecosistemica e degli usi del suolo.[7]

Il workflow è trasferibile in altri contesti mediterranei o europei qualora siano disponibili dati di uso / copertura del suolo confrontabili, una legenda riclassificabile in categorie IPCC e coefficienti coerenti con il contesto biogeografico locale. La natura a codice aperto degli strumenti impiegati riduce inoltre barriere economiche e favorisce trasparenza metodologica, riuso del codice e aggiornabilità periodica del modello. La mappatura consente di individuare infrastrutture ecologiche strategiche e di supportare modelli di gestione integrata delle risorse naturali nei sistemi urbani e periurbani (Valente et alii, 2024). In questa prospettiva il rafforzamento delle infrastrutture verdi e blu all'interno dei sistemi urbani può contribuire a ridefinire la struttura ecologica delle città e a migliorare le prestazioni ambientali dei tessuti urbani, come evidenziato anche dalle esperienze di riorganizzazione morfologica dello spazio urbano basate su modelli di prossimità e di riduzione della pressione (Rueda, 2019).

Discussione, limiti, SDG e conclusioni | La ricerca ha proposto un metodo per quantificare e rappresentare spazialmente lo stock di carbonio e il potenziale di assorbimento degli ecosistemi terrestri, con l'obiettivo di integrare la dimensione climatica nei processi di pianificazione urbanistica. Da questa prospettiva il modello potrebbe essere utilizzato per confrontare differenti condizioni territoriali: a) lo stato ecosistemico attuale, derivato dalla classificazione ambientale; b) il quadro delle destinazioni d'uso previsto dallo strumento urbanistico vigente; c) gli scenari di trasformazione associati alle previsioni di Piano o ai progetti di rigenerazione urbana (Corradi et alii, 2024). L'interazione tra questi tre livelli consente di interpretare la distribuzione dello stock di carbonio non come una semplice fotografia dello stato ambientale del territorio bensì come indicatore utile a supportare la definizione delle scelte urbanistiche e la valutazione delle loro implicazioni ecologiche.

Rispetto a molte stime ecologiche tradizionali, spesso limitate alla dimensione descrittiva o conservazionistica, il modello qui proposto è esplicitamente orientato all'uso decisionale. Parallelamente, rispetto a numerosi strumenti urbanistici che includono obiettivi climatici in forma qualitativa, il contributo introduce metriche spazialmente verificabili e confrontabili. In questo senso il paper si colloca in uno spazio intermedio ancora poco esplorato tra ecologia applicata, analisi urbana e pianificazione climatica. L'utilizzo di coefficienti medi di stock di carbonio derivati dalla letteratura scientifica introduce inevitabilmente margini di variabilità legati alle condizioni ecologiche locali. Per questo motivo il modello può essere interpretato come una prima base di valutazione territoriale, coerente con gli approcci Tier 1 e Tier 2 delle linee guida IPCC (Gasparini et alii, 2022).

L'integrazione con dati di campo, inventari forestali o dati di telerilevamento potrebbe contribuire a migliorare la precisione delle stime. Ulteriori condizioni di validità riguardano la qualità e l'aggiornamento dei dataset territoriali di partenza, la coerenza della scala cartografica utilizzata e la correttezza del processo di riclassificazione tra categorie ecosistemiche locali e classi IPCC. In assenza di tali condizioni il modello può mantenere valore comparativo relativo ma ridurre l'affidabilità assoluta delle stime; inoltre tra le principali barriere all'adozione si segnalano: 1) la frammentazione amministrativa delle basi dati; 2) la limitata disponibilità di competenze geospaziali avanzate nelle amministrazioni locali; 3) la difficoltà di integrare metriche innovative nei dispositivi urbanistici tradizionali; 4) la frequente assenza di procedure standard per il monitoraggio post-attuativo dei Piani. Nel complesso la ricerca evidenzia come la quantificazione e la rappresentazione spaziale del carbonio possano diventare strumenti operativi per rafforzare il rapporto tra conoscenza ecologica e pianificazione urbanistica. Il contributo diretto appare particolarmente rilevante rispetto a quattro Obiettivi di Sviluppo Sostenibile: in relazione all'SDG 9 il metodo introduce innovazione procedurale, interoperabilità informativa e supporto decisionale basato sulle evidenze; con riferimento all'SDG 11 il modello offre strumenti utili alla pianificazione urbana resiliente, alla localizzazione di infrastrutture verdi e alla rigenerazione ecologica dei tessuti costruiti; rispetto all'SDG 13 consente di integrare metriche climatiche nei processi di Piano e di valutare scenari di mitigazione e adattamento; in relazione all'SDG 15 contribuisce alla tutela e valorizzazione funzionale degli ecosistemi terrestri e periurbani. Sono inoltre presenti sinergie indirette con l'SDG 10 laddove la distribuzione territoriale delle prestazioni ecosistemiche venga utilizzata per leggere asimmetrie socio-spaziali e con l'SDG 12 qualora il modello orienti a usi del suolo più efficienti e meno dissipativi.

Non mancano tuttavia possibili compromessi: interventi di densificazione urbana non accompagnati da compensazioni ecologiche possono ridurre la capacità di assorbimento; processi di rinaturalizzazione non coordinati possono entrare in tensione con fabbisogni insediativi o infrastrutturali; meccanismi di valorizzazione economica del carbonio possono produrre effetti distorsivi se privi di adeguati controlli pubblici.

Il principale avanzamento del contributo consiste tuttavia nell'aver trasformato una base dati ecosistemica locale in un sistema interpretativo capace di dialogare con standard climatici internazionali e con processi ordinari del governo del territorio. Il metodo potrebbe essere integrato nei procedimenti di Valutazione Ambientale Strategica, nei quadri conoscitivi dei Piani urbanistici comunali, nei programmi di rigenerazione urbana e nei sistemi di monitoraggio delle trasformazioni territoriali. Ulteriori sviluppi possono riguardare l'integrazione con dati LiDAR, telerilevamento multispettrale, rilievi di campo e modelli di gemelli digitali territoriali.

La trasferibilità del workflow in altri contesti mediterranei suggerisce la possibilità di costruire una nuova generazione di strumenti urbanistici responsivi al clima, nei quali la misurabilità delle prestazioni ecosistemiche accompagna le scelte insediative, infrastrutturali e paesaggistiche. In tal senso il con-

LEG_CALABR	Calopinace ecosystem group (1–7)	Dominant vegetation structure	Land use / management	IPCC category (2019)
Beech forests of Southern Italy	1. Temperate and Mediterranean forests	Trees	Natural	Forest Land
Castanea sativa woodlands	1. Temperate and Mediterranean forests	Trees	Natural / traditionally managed	Forest Land
Mediterranean downy oak woodlands	1. Temperate and Mediterranean forests	Trees	Natural	Forest Land
Thermo- and meso-Mediterranean holm oak forests	1. Temperate and Mediterranean forests	Trees	Natural	Forest Land
Pinus nigra reforested stands	1. Temperate and Mediterranean forests	Trees	Managed forestry	Forest Land
Aleppo pine forests	1. Temperate and Mediterranean forests	Trees	Natural	Forest Land
Stone pine forests (Pinus pinea)	1. Temperate and Mediterranean forests	Trees	Managed	Forest Land
Riparian poplar forests	6. Wetlands and riparian ecosystems	Trees	Natural	Forest Land
Woodlands and thickets of non-native broadleaved species	1. Temperate and Mediterranean forests	Trees / shrubs	Secondary naturalised	Forest Land
Recently deforested areas (fires and avalanches)	1. Temperate and Mediterranean forests	Trees (residual)	Natural / disturbed	Forest Land (disturbed)
Cytisus scrublands	2. Mediterranean shrublands and maquis	Shrubs	Natural	Grassland (shrubland)
Garrigue with Ampelodesmos mauritanicus	2. Mediterranean shrublands and maquis	Shrubs / herbs	Natural	Grassland
Spartium junceum broomlands	2. Mediterranean shrublands and maquis	Shrubs	Natural	Grassland
Hill and mountain broom shrublands	2. Mediterranean shrublands and maquis	Shrubs	Natural	Grassland
Riparian willow shrublands	6. Wetlands and riparian ecosystems	Shrubs	Natural	Grassland (shrubland)
Arundo donax formations	6. Wetlands and riparian ecosystems	Tall herbaceous vegetation	Managed / anthropogenic	Grassland (riparian)
Bramble thickets	2. Mediterranean shrublands and maquis	Shrubs	Secondary naturalised	Grassland
Mediterranean tall-grass steppes (Hyparrhenia)	3. Mediterranean grasslands and steppes	Herbaceous vegetation	Natural	Grassland
Subnitrophilous grasslands	3. Mediterranean grasslands and steppes	Herbaceous vegetation	Natural / disturbed	Grassland
Pteridium aquilinum stands	3. Mediterranean grasslands and steppes	Herbaceous vegetation	Secondary naturalised	Grassland
Olive groves	4. Tree-based agroecosystems	Trees	Managed	Cropland
Citrus orchards	4. Tree-based agroecosystems	Trees	Managed	Cropland
Productive chestnut groves	4. Tree-based agroecosystems	Trees	Managed	Cropland
Fruit orchards	4. Tree-based agroecosystems	Trees	Managed	Cropland
Broadleaved plantations	4. Tree-based agroecosystems	Trees	Managed	Cropland
Extensive arable crops	5. Herbaceous crops and agricultural mosaics	Herbaceous vegetation	Managed	Cropland
Intensive arable crops	5. Herbaceous crops and agricultural mosaics	Herbaceous vegetation	Managed	Cropland
Gardens and complex agricultural systems	5. Herbaceous crops and agricultural mosaics	Herbaceous vegetation / low shrubs	Managed	Cropland
Mediterranean riverbeds	7. Anthropised, extractive and coastal areas	Non-vegetated	Natural / extractive	Other Land
Watercourses with sparse or absent vegetation	7. Anthropised, extractive and coastal areas	Non-vegetated	Natural	Other Land
Artificial canals and freshwater reservoirs	6. Wetlands and riparian ecosystems	Non-vegetated	Managed / anthropogenic	Wetlands
Vegetated freshwater lakes and ponds	6. Wetlands and riparian ecosystems	Aquatic herbaceous vegetation	Natural	Wetlands
Quarries, excavations and landfills	7. Anthropised, extractive and coastal areas	Non-vegetated	Extractive	Other Land
Abandoned quarries and debris deposits	7. Anthropised, extractive and coastal areas	Pioneer herbs / shrubs	Extractive / renaturalised	Other Land
Sandy beaches	7. Anthropised, extractive and coastal areas	Non-vegetated	Natural / coastal	Other Land
Non-vegetated pebble and gravel beaches	7. Anthropised, extractive and coastal areas	Non-vegetated	Natural / coastal	Other Land
Urban settlements	7. Anthropised, extractive and coastal areas	Absent or ornamental vegetation	Urban	Settlements
Parks, gardens and green areas	7. Anthropised, extractive and coastal areas	Trees / shrubs	Urban	Settlements
Road and railway infrastructure	7. Anthropised, extractive and coastal areas	Non-vegetated	Urban / industrial	Settlements
Industrial, commercial and major infrastructure sites	7. Anthropised, extractive and coastal areas	Non-vegetated	Urban / industrial	Settlements

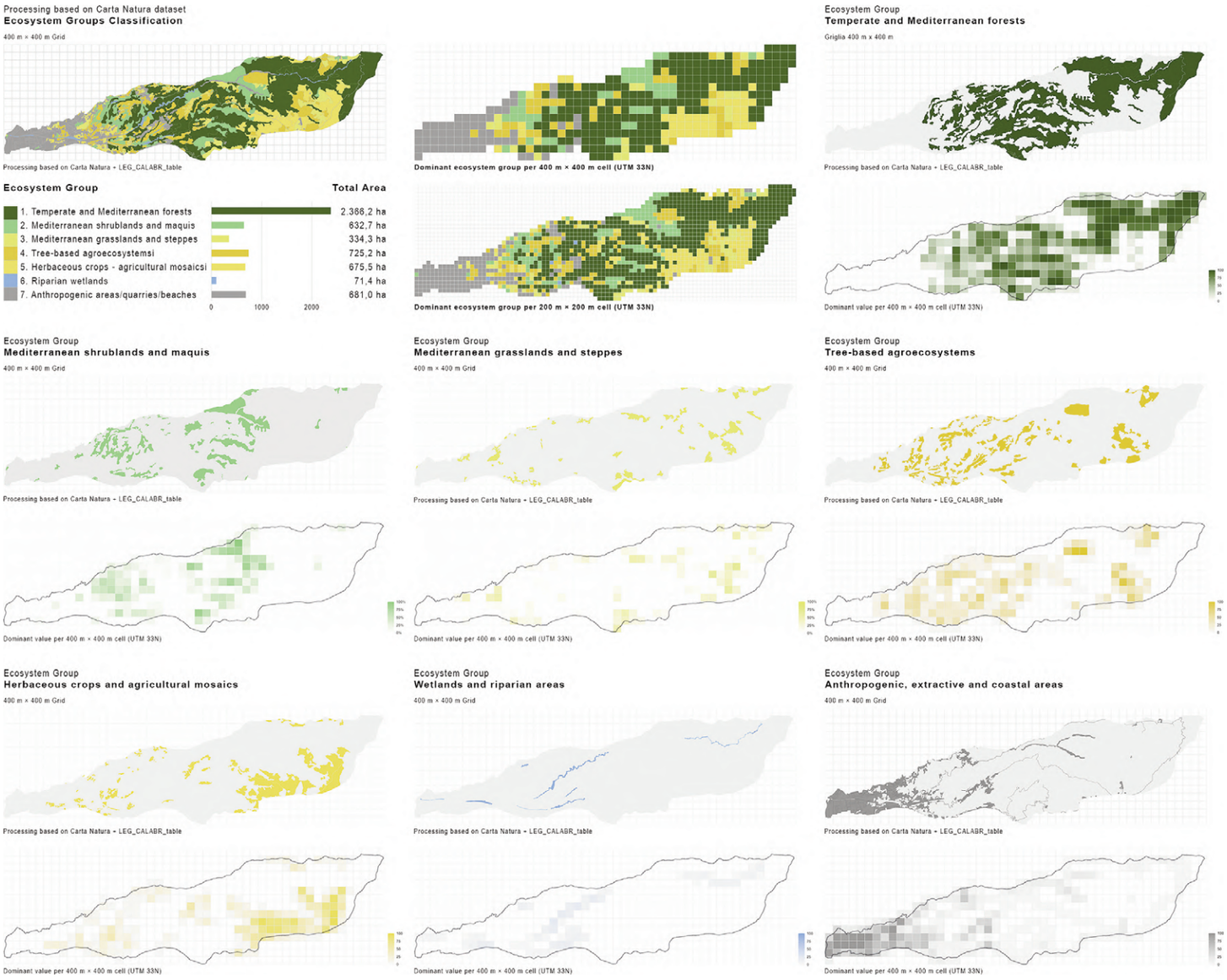


Fig. 3 | Distribution of the 7 functional ecosystem groups derived from Carta Natura in the Calopinace Torrent basin and identification of the dominant group per cell through regular grids of 400 × 400 m and 200 × 200 m used for carbon-stock modelling (credit: the Authors, 2026).

tributo intende rafforzare il dibattito disciplinare sul ruolo della pianificazione urbanistica nella transizione ecologica contemporanea.

The acceleration of climate change, the progressive degradation of ecosystems, and the intensification of socio-economic inequalities have called into question the capacity of design and planning disciplines to interpret and govern processes of territorial and urban transformation. Within this framework, the Sustainable Development Goals (SDGs) promoted by the United Nations (UN, 2015) have progressively become a strategic reference for steering development trajectories towards models capable of combining environmental sustainability, technological innovation, and social equity (Ricci, Poli and Marino, 2025). Several studies have shown that these goals do not operate independently, but are characterised by complex relations of synergy and trade-off that require integrated approaches capable of assessing the systemic effects of territorial policies (Randers et alii, 2019). Among these goals, SDG 9 (Industry, Innovation, and Infrastructure) and SDG 11 (Sustainable Cities and Communities) are particularly relevant to the contemporary debate on the future of the built environment: on the one hand, infrastructures, technologies, and production systems constitute the material backbone through which economic development and territorial transformations are organised; on the other, the spatial distribution of environmental resources, ecosystem services, and exposure to climate risks often reflects – and at times amplifies – existing socio-territorial inequalities (Barbier and Burgess, 2019; Pham-Truffert et alii, 2020).

Cities emerge as privileged contexts in which environmental, technological, and social transitions become especially evident. Urban environments concentrate most of the world's population and economic activities, while at the same time representing the main generators of ecological pressures, including land take, the intensive use of resources, and climate-altering emissions (UN-Habitat, 2022). At the same time, the spatial configuration of urban systems often determines an unequal distribution of environmental benefits and climate risks, contributing to the formation of genuine forms of environmental inequality.

Addressing these challenges requires the development of new interpretative and operational frameworks capable of integrating ecosystem knowledge, spatial modelling, and design practices. In this sense, the growing availability of data, computational environments, and geospatial modelling tools is encouraging the consolidation of data-informed approaches to urban planning, in which environmental processes can be quantified, simulated, and integrated into decision-making processes. This perspective is part of an interpretation of territories as multilevel dynamic systems, in which relations between ecological, infrastructural, and socio-territorial components form complex networks of interdependence (Gausa, 2024). The Tech4You Research and Innovation Pro-

gramme[1], funded under the National Recovery and Resilience Plan, is situated within this context and aims to build an innovation ecosystem oriented towards the development of models, technologies, and tools for climate-change adaptation in the regions of Southern Italy. Within this framework, Pilot Project 4.6.1[2] (Fig. 1) develops integrated approaches for reducing climate vulnerability through the construction of data-informed planning models capable of integrating ecosystem analyses, climate simulations, and digital (and physical) decision-support systems.

In this scenario, ecosystem services and carbon accounting models assume a significant role as operational metrics capable of translating ecological processes into measurable and comparable indicators. In particular, carbon is configured as a strategic parameter in the interpretation and management of territories, capable of relating ecological dynamics, land-use transformations, and climate-change mitigation policies (Domke et alii, 2019).

However, despite the growing scientific production in this field, a significant gap remains between ecological knowledge and its effective integration into planning processes. Many studies provide detailed ecological assessments that are difficult to translate into operational tools, while traditional planning instruments often lack robust ecosystem indicators capable of supporting ex ante and ex post assessments of transformations.

A twofold critical issue also persists: on the one hand, numerous studies on carbon accounting have been developed in forestry, agricultural, or environmental fields without any real translation into urban-planning processes; on the other, many climate-planning practices still operate without standardised and comparable biophysical metrics. This is compounded by the limited availability of open and replicable workflows designed to compare the existing condition, the current regulatory framework, and urban transformation scenarios.

Starting from this theoretical premise, the paper proposes an integrated, open-source, and replicable GIS-R operational workflow (Longo et alii, 2024) aimed at estimating carbon stock and sequestration potential from the ecosystem classification derived from Carta Natura (Paone et alii, 2023), which describes the current biophysical condition of the territory. However, this representation does not necessarily coincide with the land-use designations established by the planning instruments in force, which constitute the regulatory framework within which territorial transformations take place. The aim of the paper is therefore to verify whether, and to what extent, an integrated GIS-R geospatial procedure based on the local adaptation between ecosystem classifications and the categories developed by the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) can constitute an operational tool for climate-responsive urban planning. The research question concerns the possibility of transforming territorial ecological data into comparable indicators useful for the ex ante and ex post assessment of planning scenarios.

The original contribution of the work lies in three aspects: the construction of an operational crosswalk matrix between Carta Natura and international carbon-accounting classes; the definition of a replicable open-source workflow; and the explicit orientation of the model towards supporting urban-planning decisions and evaluating transformation scenarios. The proposed model aims to contribute to the scientific debate on the relationship between methodological innovation, urban planning, and climate adaptation, offering a procedure that can also be applied in other Mediterranean contexts characterised by ecosystem fragility, settlement pressure, and the need for evidence-based decision-making tools.

Carbon literacy for design: carbon as a cognitive infrastructure for climate-responsive planning | Carbon has predominantly been used as an indicator for quantifying emissions and monitoring climate-mitigation targets established by international agreements, particularly within the framework of the United Nations Framework Convention on Climate Change (UN, 1992) and national emission inventories (Domke et alii, 2019). In recent years, however, the scientific literature has progressively broadened this perspective, showing how carbon can be interpreted not only as a climate variable but also as a territorial parameter capable of providing information on ecological structure, land-use dynamics, and ecosystem functioning (Pan et alii, 2011; Keith et alii, 2024).

In parallel, growing interest in ecosystem services has helped to strengthen this interpretation: the capacity of terrestrial ecosystems to sequester and store carbon represents one of the main regulating services recognised by the literature and by the principal international classifications (Millennium Ecosystem Assessment, 2005; Potschin et alii, 2016). Quantifying carbon stocks and flows therefore makes it possible to translate ecosystem functioning into measurable biophysical metrics useful for supporting sustainability-oriented territorial planning processes. Despite these advances, however, the integration of carbon metrics into planning processes remains limited. In many cases, analyses are developed within separate disciplinary fields and do not enter the operational devices of urban planning. In this context, the concept of 'carbon literacy', originally developed in the field of climate policy, can be reinterpreted as 'carbon literacy for design', that is, as a set of competences, tools, and methods capable of integrating carbon metrics into processes of territorial analysis, assessment, and decision-making.

Interpreted from this perspective, 'carbon literacy' is not limited to knowledge of climate processes, but configures carbon as an operational parameter capable of orienting urban-regeneration strategies, the design of green infrastructures, and the sustainable management of territory. This perspective is particularly relevant within European and international policies oriented towards ecological transition. The growing attention paid, for example, to carbon-accounting tools, environmental certification systems, and market mechanisms linked to ecosystem services highlights the need for reliable and comparable territorial data capable of making the environmental benefits generated by ecosystems measurable (Zhao and Shaw, 2025). Numerous studies have shown that the distribution of ecosystem services across urban and peri-urban territories is not homogeneous, but often reflects socio-spatial dynamics that influence access to environmental benefits and ecological infrastructures. In this sense, a territorial reading of ecosystem performance can help to reveal relationships between environmental quality, urban models, and spatial justice (Fiorini et alii, 2025).

Mapping carbon stock and the ecosystem capacity of territories can therefore help to make such asymmetries visible, providing knowledge tools for orienting territorial rebalancing policies and ecological-regeneration strategies. This literacy can be interpreted as a conceptual device capable of connecting different dimensions of territorial sustainability and contributing to the construction of transcalar design approaches, in which local territorial transformation strategies align with the global objectives of the 2030 Agenda and with the logics of nature-based solutions (Ingaramo et alii, 2023).

Carbon accounting, ecosystem services, and territorial governance | Traditionally, carbon accounting models have been developed mainly within climate policies and greenhouse-gas emission reporting. The guidelines developed by the IPCC (Domke et alii, 2019) are now the international

No.	Ecosystem group	Carbon stock range	Main references
1	Temperate and Mediterranean forests	100-220 tC/ha	Domke et alii (2019); Gasparini (2022); Marchetti et alii (2012)
2	Mediterranean shrublands and maquis	70-110 tC/ha	Fernandes et alii (2020)
3	Mediterranean grasslands and steppes	30-50 tC/ha	Zomer et alii (2016)
4	Tree-based agroecosystems	35-90 tC/ha	Funes et alii (2022)
5	Herbaceous crops and agrarian mosaics	20-40 tC/ha	Zomer et alii (2016)
6	Wetlands and riparian ecosystems	80-170 tC/ha	Fernandes et alii (2020)
7	Anthropized, extractive and coastal areas	< 10 tC/ha	Domke et alii (2019); Munafò (ed.) (2023)

Tab. 3 | Carbon-stock intervals (tC/ha) associated with ecosystem groups and the main bibliographic references used for carbon-stock modelling (credit: the Authors, 2026).

methodological reference for estimating carbon stocks and flows associated with land uses, forest management, and agricultural activities within the AFOLU / LULUCF[3] sector. These methodologies are used by the Member States of the United Nations Framework Convention on Climate Change for compiling national inventories of carbon emissions and removals.

This accounting has, however, progressively broadened its field of application, extending beyond climate reporting and assuming a growing role in territorial-governance processes and in the definition of environmental policies. The possibility of quantifying and spatially representing the carbon stock associated with different ecosystems makes it possible to identify strategic areas for conservation, renaturation, and sustainable land management, transforming carbon into a territorial indicator useful for orienting planning choices.

In several European territorial contexts, these approaches have been used to interpret the relationships between urbanisation dynamics, rural innovation, and ecosystem services, highlighting the role of ecological infrastructures in the definition of new integrated territorial strategies (Lombardini, Pilogallo and Tucci, 2023). The quantification of carbon stock thus becomes an operational way of translating the ecosystem capacity of territories into biophysical indicators useful for environmental and territorial planning; this approach makes it possible to reveal relationships between ecosystem structure, land uses, and settlement dynamics.

From this perspective, new tools for the economic valorisation of ecosystem services must also be considered. For these mechanisms to be applied effectively and credibly, however, knowledge bases founded on data that are verifiable, replicable, and consistent with international standards for environmental reporting are required. This framework therefore includes the standardisation of environmental metrics and the construction of interoperable information systems, which are fundamental conditions for making territorial data comparable and for supporting decision-making processes based on quantitative evidence (Bologna, Ghersi and Melli, 2023). The quantification of carbon stock and sequestration flows therefore represents a crucial step in ensuring the transparency and credibility of such systems, avoiding overestimation or the double counting of ecosystem benefits.

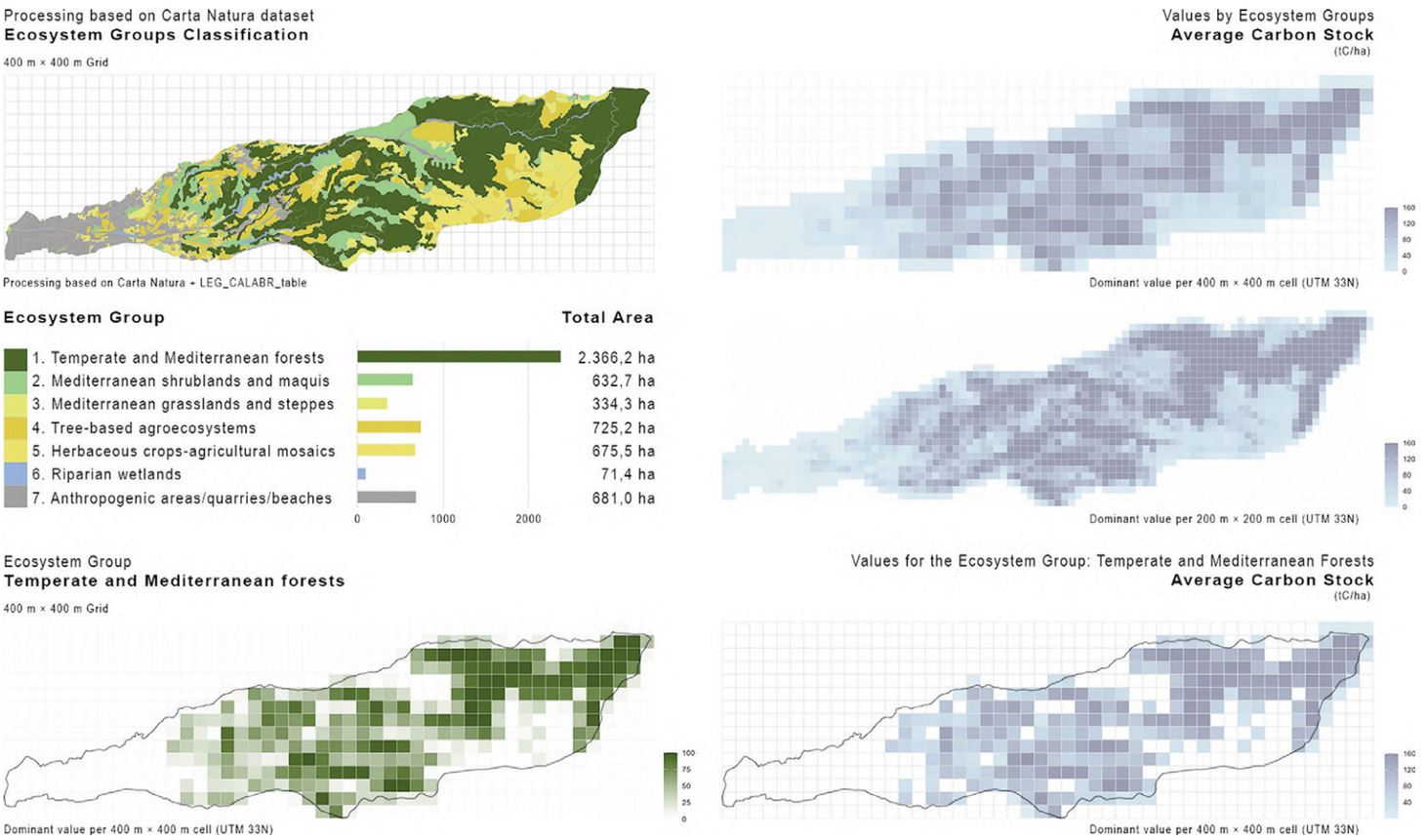
A central issue is the principle of additionality, namely the capacity to demonstrate that the ecosystem benefits generated by a given intervention would not have occurred in the absence of that action. At the same time, it becomes necessary to consider the problem of the permanence of carbon removals over time and the risk of shifting environmental pressures towards other territories.

A further significant element concerns the relationship between carbon accounting and environmental inequalities: the distribution of ecosystem services and ecological infrastructures within territories is not uniform, but often reflects historical processes of urban development and the socio-economic organisation of space. Some urban or peri-urban areas may be significantly deficient in green spaces and ecological infrastructures, exposing resident populations to more critical environmental conditions, such as the intensification of urban heat islands or greater vulnerability to extreme climate events.

Methodological approach and carbon-assessment model | The method was tested in the Fiumara Calopinace basin (Reggio Calabria), in a Mediterranean context characterised by high ecosystem fragility and strong anthropogenic pressures. The objective was to construct an analytical model capable of quantifying the ecosystem performance of the territory in terms of carbon-sequestration capacity, translating qualitative ecological information from environmental datasets into measurable and comparable biophysical indicators.

Operationally, the methodological protocol was articulated into six sequential and replicable phases: 1) acquisition and preparation of territorial data; 2) ecosystem reclassification and construction of the crosswalk matrix with IPCC categories; 3) attribution of mean carbon-stock coefficients; 4) geospatial modelling on a regular grid; 5) temporal simulation of potential growth; and 6) interpretation of results in support of urban planning. This articulation allows the study to be repeated in different contexts, provided that minimum homogeneous and georeferenced territorial data are available.

The starting point of the analysis is Carta Natura for the Calabria Region, a vector dataset that describes the distribution of ecosystems through an articulated ecological classification. In particular, the analysis was conducted using the polygon layer (clip) relating to the experimental area of the pilot project, within which 40 local ecological categories were identified. These categories constitute an extremely detailed descriptive repertoire of the ecosystem types present in the territory and represent the knowledge base on which the carbon-assessment model was constructed (Fig. 2). The minimum data required for the replicability of



Previous page

Fig. 4 | Distribution of ecosystem groups and attribution of mean carbon-stock values (tC/ha) in the Calopinace Torrent basin through spatial discretisation on regular grids of 400 × 400 m and 200 × 200 m (credit: the Authors, 2026).

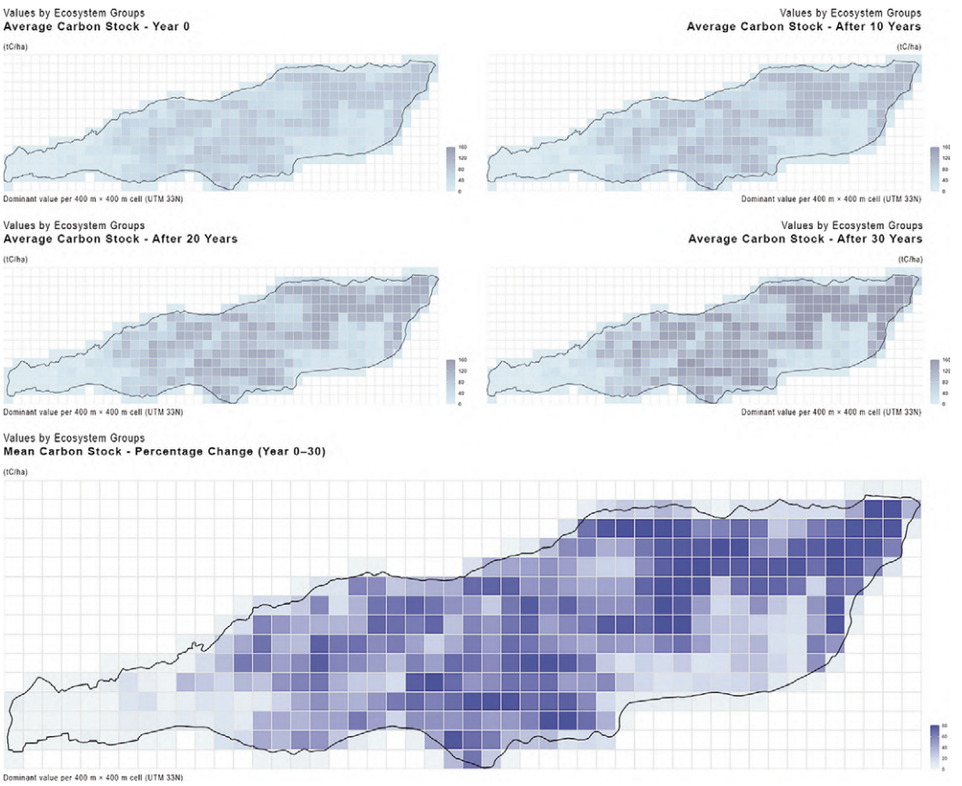


Fig. 5 | Mean annual growth rates (r) assigned to ecosystem groups and used in the compound-growth model to estimate the evolution of carbon stock and sequestration potential over time (credit: the Authors, 2026).

the model are: a) ecosystem cartography or land use / land cover in vector or raster format at adequate resolution; b) boundary of the study area; c) coherent metric reference system; d) carbon-stock coefficients derived from the literature or from official inventories; and e) any planning instruments in force for comparative analyses between the existing condition and planning scenarios.

The high level of detail in the Carta Natura legend made it difficult to assign stock values directly to individual categories. To overcome this limitation, a functional reclassification was applied, based on the construction of a correspondence table between local ecological categories and the land-use classes established by the IPCC guidelines (Domke et alii, 2019), which represent the international standard for estimating carbon stocks and flows in terrestrial ecosystems and constitute the methodological reference used by States for compiling national inventories of carbon emissions and removals.

The reclassification process was conducted on the basis of three main criteria: 1) the structure of the dominant vegetation; 2) the type of land use or management; and 3) the average biomass and soil organic-carbon content associated with the different ecosystems. Through this procedure, 7 functional ecosystem groups were identified (Tab. 1), representing a local adaptation of the IPCC categories and making it possible to connect the ecological classification of Carta Natura to international carbon-accounting models. The procedure for constructing the matrix is one of the central elements of the method, since it enables local ecological taxonomies to be translated into internationally comparable classes while preserving the territorial detail required for urban-planning applications. Once the reclassification structure had been defined, it was possible to attribute mean carbon-stock values to ecosystems through a systematic review of the international and national scientific literature on the estimation of biomass and organic carbon in terrestrial ecosystems. The main sources used include the IPCC guidelines for the AFOLU and LULUCF sectors, the Italian National Forest Inventory and Forest Carbon Pools[4] (INFC), and several studies devoted to the quantification of carbon in Mediterranean ecosystems.

Starting from these sources, reference intervals for carbon stock, expressed in tonnes per hectare (tC/ha), were identified for each ecosystem group; to reduce variability between different study contexts, a representative mean value was adopted for each category, calculated as the average of the intervals reported in the scientific literature. The approach adopted is consistent with the Tier 1 and Tier 2 methodological levels established by the IPCC guidelines and based on the use of mean coefficients derived from the literature and from national forest inventories (Tab. 2). The use of mean coefficients makes the method immediately applicable even in the absence of direct measurement campaigns, configuring it as an appropriate solution for preliminary analyses, territorial screenings, and comparative assessments between scenarios.

Once the mean carbon-stock values had been attributed to ecosystems, the geospatial-modelling phase was initiated to construct a continuous density surface[5] (Fig. 3). This procedure made it possible to produce continuous maps of carbon density, useful for representing the spatial distribution of the territory's ecosystem capacity. The processing was carried out, taking account of the relevant reference intervals (Tab. 3), through the integration of QGIS and the RStudio computational environment, ensuring the traceability of operations and the replicability of the entire analytical operational workflow (Fig. 4). The use of a dual spatial resolution makes it possible to compare different scales of interpretation[6]: the 400 m grid is more suitable for strategic interpretations at broad-area scale, while the 200 m grid allows more detailed readings useful at urban and design scale. The model makes it possible to estimate future carbon stock from the initial stock and from a mean annual growth rate specific to each ecosystem group.

Subsequently, three simulation time horizons – 10, 20, and 30 years – were considered in order to assess the potential evolution of the ecosystem system in the medium and long term. Each group was assigned a representative mean stock value (tC/ha), calculated as the arithmetic mean of the reference interval, from which a mean annual growth rate (r) was then derived and used to estimate sequestration potential (Fig. 5). Potential sequestration was expressed according to the relation $A_i = S_i \times r_i$, where 'A_i' represents average sequestration per unit area (tC/ha/ year), 'S_i' the mean reference stock, and 'r_i' the ecosystem-specific growth rate (Zomer et alii, 2016). These values derive from a functional adaptation of the parameters proposed by the IPCC (Domke et alii, 2019) and from the main studies on net productivity and carbon accumulation in Mediterranean ecosystems (Marchetti et alii, 2012; Fernandes et alii, 2020; Funes et alii, 2022). This framing makes it possible to connect ecosystem structure directly to the dynamics of carbon flows, translating vegetation type into a biophysical sequestration parameter. The simulations show that carbon-sequestration capacity varies significantly according to ecosystem structure and land uses.[7]

The workflow is transferable to other Mediterranean or European contexts where comparable land-use / land-cover data, a legend that can be reclassified into IPCC categories, and coefficients consistent with the local biogeographical context

are available. The open-source nature of the tools used also reduces economic barriers and promotes methodological transparency, code reuse, and the periodic updatability of the model. The mapping makes it possible to identify strategic ecological infrastructures and support integrated natural-resource management models in urban and peri-urban systems (Valente et alii, 2024). From this perspective, strengthening green and blue infrastructures within urban systems can help to redefine the ecological structure of cities and improve the environmental performance of urban fabrics, as also shown by experiences of the morphological reorganisation of urban space based on models of proximity and pressure reduction (Rueda, 2019).

Discussion, limits, SDGs, and conclusions | The research proposed a method for quantifying and spatially representing the carbon stock and sequestration potential of terrestrial ecosystems, with the aim of integrating the climate dimension into urban-planning processes. From this perspective, the model could be used to compare different territorial conditions: a) the current ecosystem condition, derived from environmental classification; b) the framework of land-use designations established by the planning instrument in force; and c) transformation scenarios associated with planning provisions or urban-regeneration projects (Corradi et alii, 2024). The interaction between these three levels makes it possible to interpret the distribution of carbon stock not as a simple snapshot of the territory's environmental condition, but as an indicator useful for supporting the definition of urban-planning choices and the assessment of their ecological implications.

Compared with many traditional ecological estimates, often limited to the descriptive or conservation dimension, the model proposed here is explicitly oriented towards decision-making use. At the same time, compared with many planning instruments that include climate objectives in qualitative form, the contribution introduces spatially verifiable and comparable metrics. In this sense, the paper occupies an intermediate space, still insufficiently explored between applied ecology, urban analysis, and climate planning.

The use of mean carbon-stock coefficients derived from the scientific literature inevitably introduces margins of variability linked to local ecological conditions. For this reason, the model can be interpreted as a first basis for territorial assessment, consistent with the Tier 1 and Tier 2 approaches of the IPCC guidelines (Gasparini et alii, 2022). Integration with field data, forest inventories, or remote-sensing data could help to improve the precision of the estimates. Further validity conditions concern the quality and updating of the initial territorial datasets, the coherence of the cartographic scale used, and the correctness of the reclassification process between local ecosystem categories and IPCC classes. In the absence of these conditions, the model may retain relative comparative value, while reducing the absolute reliability of the estimates; moreover, the main barriers to adoption include: 1) the administrative fragmentation of data sources; 2) the limited availability of advanced geospatial skills within local administrations; 3) the difficulty of integrating innovative metrics into traditional planning instruments; and 4) the frequent absence of standard procedures for post-implementation monitoring of Plans.

Overall, the research shows how the quantification and spatial representation of carbon can become operational tools for strengthening the relationship between ecological knowledge and urban planning. The direct contribution is particularly relevant to four Sustainable Development Goals: in relation to SDG 9, the method introduces procedural innovation, information interoperability, and evidence-based decision support; with reference to SDG 11, the model offers tools useful for resilient urban planning, the location of green infrastructures, and the ecological regeneration of built fabrics; with respect to SDG 13, it allows climate metrics to be integrated into planning processes and mitigation and adaptation scenarios to be assessed; and in relation to SDG 15, it contributes to the protection and functional valorisation of terrestrial and peri-urban ecosystems. There are also indirect synergies with SDG 10 where the territorial distribution of ecosystem performance is used to read socio-spatial asymmetries, and with SDG 12 where the model orients land uses towards greater efficiency and lower dissipation.

Possible trade-offs nevertheless remain: urban densification interventions not accompanied by ecological compensation may reduce sequestration capacity; uncoordinated renaturation processes may come into tension with settlement or infrastructural needs; and mechanisms for the economic valorisation of carbon may produce distorting effects if they lack adequate public oversight.

The main advancement of the contribution, however, consists in having transformed a local ecosystem dataset into an interpretative system capable of engaging with international climate standards and ordinary processes of territorial governance. The method could be integrated into Strategic Environmental Assessment procedures, the knowledge frameworks of municipal urban plans, urban-regeneration programmes, and systems for monitoring territorial transformations. Further developments may concern integration with LiDAR data, multispectral remote sensing, field surveys, and territorial digital-twin models.

The transferability of the workflow to other Mediterranean contexts suggests the possibility of constructing a new generation of climate-responsive planning instruments, in which the measurability of ecosystem performance accompanies settlement, infrastructural, and landscape choices. In this sense, the contribution aims to strengthen the disciplinary debate on the role of urban planning in the contemporary ecological transition.

Acknowledgements

This research is the result of the activities carried out within the following concluded PNRR research project, funded by the European Union – NextGenerationEU: 'Pilot Project 4.6.1 – Climate-adaptation plans for reducing the ecological footprint and ecological debt, aimed at improving conservation and transformation responses in terms of resilience and quality of life in the Calabrian and Lucanian urban and territorial system' (Goal 4.6 – Climate-change planning for promoting cultural and natural heritage: demand-driven ecosystem services based on ICT and AI enabling technologies – Tech4You Innovation Ecosystem), funded by the European Union – NextGenerationEU, Mission 4 – Component 2, CUP C33C22000290006 (ECS_000 00009).

The paper is the result of a shared reflection by the Authors. Nevertheless, the introductory paragraph is attributed to F. Moraci; 'Carbon literacy for design: carbon as a cognitive infrastructure for climate-responsive planning' to A. Barresi; 'Carbon accounting, ecosystem services, and territorial governance' to P. Bova; 'Methodological approach and carbon-assessment model' to F. Trimboli; and the paragraph 'Discussion, limits, SDGs, and conclusions' was written jointly by all the Authors.

Notes

1) The Tech4You project, entitled 'Technologies for Climate Change Adaptation and Quality of Life Improvement', is funded by the PNRR (approximately 122 million euros) under Mission 4 'Education and Research', Component 2 'From Research to Business', Investment 1.5 'Creation and strengthening of innovation ecosystems for sustainability'. The Tech4You research lines focus on valorising the innovation potential of two of Italy's 'Less developed regions', Basilicata and Calabria, now classified as 'Transition regions', promoting an ecosystem in which scientific research, conducted by Universities and Research Centres, engages with the needs of citizens and Public Administrations, and is transferred into technological and applied solutions developed by local enterprises with the support of actors specialised in industrial innovation.

2) Pilot Project 4.6.1 – 'Climate-adaptation plans for reducing the ecological footprint and ecological debt, aimed at improving conservation and transformation responses in terms of resilience and quality of life in the Calabrian and Lucanian urban and territorial system' (Goal 4.6 – 'Climate-change planning for promoting cultural and natural heritage: demand-driven ecosystem services based on ICT and AI enabling technologies') is one of the projects funded with 2.3 million euros within the Tech4You innovation ecosystem, for which Prof. Francesca Moraci (UniRC) is Scientific Coordinator. The project is articulated into six actions and involves two Departments, three Research Laboratories, eighteen professors / researchers, and nine research fellows; the research funds also enabled the creation of a new interdepartmental instrumental laboratory.

3) The AFOLU sector (Agriculture, Forestry, and Other Land Use) and its specific component LULUCF (Land Use, Land-Use Change, and Forestry) are fundamental in the global strategy for climate change mitigation, acting both as sources of emissions and as carbon sinks.

4) The 'inventarioforestale.org' portal provides access to the results and products of the Italian National Forest Inventory and Forest Carbon Pools (INFC); in addition, statistics, raw data, and project documentation can be accessed, which are essential for the correct interpretation of the information.

5) For this purpose, the territory was discretised by means of a regular grid with cells of 400 × 400 metres and 200 × 200 metres, representing uniform and comparable spatial units of analysis. Within each cell, the weighted mean carbon stock was calculated from the combination of the mean value associated with the ecosystem type and the surface area actually occupied by each ecosystem within the cell.

6) The simulation is not intended to represent a deterministic forecast, but rather a parametric evolutionary scenario useful for comparing alternative trajectories of conservation, renaturation, or urban transformation.

7) Forest and riparian ecosystems constitute the main carbon reservoirs, while agricultural and anthropised surfaces present significantly lower stocks and growth rates. These differences reflect the morphological and ecological structure of the territory and make it possible to identify areas of high ecosystem efficiency, areas with recovery potential, and zones characterised by structural criticalities.

References

Barbier, E. B. and Burgess, J. C. (2019), "Sustainable development goal indicators – Analyzing trade-offs and complementarities", in *World Development*, vol. 122, pp. 295-305. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.worlddev.2019.05.026 [Accessed 28 March 2026].

Bologna, A., Ghersi, A. and Melli, S. (2023), "Letture integrate per il verde pensile urbano – Codici espressivi e forme di natura | Integrated readings for the urban green roof – Expressive codes and forms of nature", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 11, pp. 114-123. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/11102022 [Accessed 28 March 2026].

Corradi, M., Stevens, T., Macaione, I., Raffa, A. and Andaloro, B. (2024), "Rigenerazione climatica green degli streetscapes – L'esperienza di De Urbanisten ad Anversa | Green climate-adaptive streetscapes regeneration – The De Urbanisten Experience in Antwerp", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 16, pp. 60-73. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/1652024 [Accessed 20 April 2026].

Domke, G., Brandon, A., Diaz-Lasco, R., Federici, S., Garcia-Apaza, E., Grassi, G., Gschwantner, T., Herold, M., Hirata, Y., Kasimir, Å, James Kinyanjui, M., Krisnawati, H., Lehtonen, A., Malimbwi, R. E., Niinistö, S., Ogle, S. M., Paul, T., Ravindranath, N. H., Rock, J., Sanquetta, C. R., Sanchez, M. J. S., Vitullo, M., Wakelin, S. J. and Zhu, J. (2019), "Chapter 4 – Forest Land", in Calvo Buendia, E., Tanabe, K., Kranjc, A., Baasansuren, J., Fukuda, M., Ngarize, S., Osako, A., Pyrozhenko, Y., Shermanau, P. and Federici, S. (eds), *Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories – Vol. 4 – Agriculture, Forestry and Other Land Use*, Intergovernmental Panel on Climate Change, Geneva. [Online] Available at: ipcc.ch/report/2019-refinement-to-the-2006-ipcc-guidelines-for-national-greenhouse-gas-inventories/ [Accessed 28 March 2026].

Fernandes, M. R., Aguiar, F. C., Martins, M. J., Rico, N., Ferreira, M. T. and Correia, A. C. (2020), "Carbon Stock Estimations in a Mediterranean Riparian Forest – A Case Study Combining Field Data and UAV Imagery", in *Forests*, vol. 11, issue 4, article 376, pp. 1-21. [Online] Available at: doi.org/10.3390/f11040376 [Accessed 28 March 2026].

Fiorini, L., Saganeiti, L., Perazzini, M., Bontempo, D., Bucci, M., Giancola, M. and Perilli, E. (2025), "L'impatto dei modelli urbani sul supporto sociale – Tra giustizia spaziale e sviluppo sostenibile | The impact of urban models on social support – Between spatial justice and sustainable development", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 17, pp. 196-207. [Online] Available at: doi.org/10.69143/2464-9309/17132025 [Accessed 28 March 2026].

Funes, I., Molowny-Horas, R., Savé, R., De Herralde, F., Aranda, X. and Vayreda, J. (2022), "Carbon stocks and changes in biomass of Mediterranean woody crops over a six-year period in NE Spain", in *Agronomy for Sustainable Development*, vol. 42, article 98, pp. 1-15. [Online] Available at: doi.org/10.1007/s13593-022-00827-y [Accessed 28 March 2026].

Gasparini, P., Di Cosmo, L., Floris, A. and De Laurentis, D. (eds) (2022), *Italian National Forest Inventory – Methods and Results of the Third Survey | Inventario Nazionale delle Foreste e dei Serbatoi Forestali di Carbonio – Metodi e Risultati della Terza Indagine*, Springer, Cham. [Online] Available at: doi.org/10.1007/978-3-030-98678-0 [Accessed 28 March 2026].

Gausa, M. (2024), "Complessità, n-città e sistemi dinamici multilivello – Verso una (geo)urbanità in rete e in reti | Complexity, n-city, and multilevel dynamic systems – Towards a networked (geo)urbanity and networks", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 16, pp. 16-29. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/1612024 [Accessed 28 March 2026].

Ingaramo, R., Negrello, M., Khachatourian Saradehi, l. and Khachatourian Saradhi, A. (2023), "Il progetto transcalare delle nature-based solutions per l'Agenda 2030 – Innovazioni e interconnessioni | Transcalar project of nature-based solutions for the 2030 Agenda – Innovations and interconnections", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 13, pp. 97-108. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/1382023 [Accessed 28 March 2026].

Keith, H., Kun, Z., Hugh, S., Svoboda, M., Mikoláš, M., Adam, D., Bernatski, D., Blujdea, V., Bohn, F., Camarero, J. J., Demeter, L., Di Filippo, A., Dutcă, I., Garbarino, M., Horváth, F., Ivkovich, V., Jansons, Ā., Ķēņina, L., Kral, K., Martin-Benito, D., Molina-Valero, J. A., Motta, R., Nagel, T. A., Panayotov, M., Pérez-Cruzado, C., Piovesan, G., Roibu, C.-C., Šamonil, P., Vostarek, O., Yermokhin, M., Zlatanov, T. and Mackey, B. (2024), "Carbon carrying capacity in primary forests shows potential for mitigation achieving the European Green Deal 2030 target", in *Communications | Earth & Environment*, vol. 5, article 256, pp. 1-13. [Online] Available at: doi.org/10.1038/s43247-024-01416-5 [Accessed 28 March 2026].

Lombardini, G., Pilogallo, A. and Tucci, T. (2023), "Innovazione rurale, servizi eco-sistemici e processi di urbanizzazione in Liguria, tra costa ed entroterra | Rural innovation, ecosystem services and urbanisation processes in Liguria, between coastal and inner areas", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 13, pp. 205-216. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/13172023 [Accessed 28 March 2026].

Longo, D., Turillazzi, B., Roversi, R., Lilla, L., Nucci, C. A., Piccinini, A. and Costa, A. (2024), "Gemello digitale urbano e modellazione energetica – Esperienze e analisi di casi d'uso | Urban Digital Twin and Energy Modeling – Experiences and case study analyses", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 15, pp. 160-169. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/15122024 [Accessed 20 April 2026].

Marchetti, M., Sallustio, L., Ottaviano, M., Barbati, A., Corona, P., Tognetti, R., Zavattero, L. and Capotorti, G. (2012), "Carbon sequestration by forests in the National Parks of Italy", in *Plant Biosystems | An International Journal Dealing with all Aspects of Plant Biology*, vol. 146, issue 4, pp. 1001-1011. [Online] Available at: doi.org/10.1080/11263504.2012.738715 [Accessed 28 March 2026].

Millennium Ecosystem Assessment (2005), *Ecosystems and human well-being – Wetlands and water – Synthesis*, World Resources Institute, Washington (DC). [Online] Available at: millenniumassessment.org/documents/document.358.aspx.pdf [Accessed 28 March 2026].

Munafò, M. (ed.) (2023), *Consumo di suolo, dinamiche territoriali e servizi ecosistemici*, Report SNPA 37/23. [Online] Available at: snpambiente.it/wp-content/uploads/2023/10/Rapporto_consumo_di_suolo_2023.pdf [Accessed 20 April 2026].

Pan, Y., Birdsey, R. A., Fang, J., Houghton, R., Kauppi, P. E., Kurz, W. A., Phillips, O. L., Shvidenko, A., Lewis, S. L., Canadell, J. G., Ciais, P., Jackson, R. B., Pacala, S. W., McGuire, A. D., Piao, S., Rautiainen, A., Sitch, S. and Hayes, D. (2011), "A Large and Persistent Carbon Sink in the World's", in *Science*, vol. 333, issue 6045, pp. 988-993. [Online] Available at: doi.org/10.1126/science.1201609 [Accessed 28 March 2026].

Pham-Truffert, M., Metz, F., Fischer, M., Rueff, H. and Messerli, P. (2020), "Interactions among Sustainable Development Goals – Knowledge for identifying multipliers and virtuous cycles", in *Sustainable Development*, vol. 28, issue 5, pp. 1236-1250. [Online] Available at: doi.org/10.1002/sd.2073 [Accessed 28 March 2026].

Paone, R., Caridi, M., Caruso, P., Augello, R. and Capogrossi, R. (2023), *Carta della Natura della Regione Calabria – Carta degli habitat alla scala 1:25.000*, Regione Calabria, ISPRA. [Online] Available at: isprambiente.gov.it/it/servizi/sistema-carta-della-natura/cartografia/carta-della-natura-alla-scala-1-50.000/calabria [Accessed 20 April 2026].

Potschin, M., Haines-Young, R., Fish, R. and Turner, R. K. (eds) (2016), *Routledge Handbook of Ecosystem Services*, Routledge, London. [Online] Available at: doi.org/10.4324/9781315775302 [Accessed 28 March 2026].

Randers, J., Rockström, J., Stoknes, P. E., Goluke, U., Collste, D., Cornell, S. E. and Donges, J. (2019), "Achieving the 17 Sustainable Development Goals within 9 planetary boundaries", in *Global Sustainability*, vol. 2, article e24, pp. 1-11. [Online] Available at: doi.org/10.1017/sus.2019.22 [Accessed 28 March 2026].

Ricci, L., Poli, I. and Marino, M. (2025), "Welfare urbano e rigenerazione – Sostenibilità e inclusione sociale per il raggiungimento degli SDG | Urban welfare and regeneration – Sustainability and social inclusion for achieving the SDGs", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 17, pp. 94-107. [Online] Available at: doi.org/10.69143/2464-9309/1752025 [Accessed 20 April 2026].

Rueda, S. (2019), "Superblocks for the Design of New Cities and Renovation of Existing Ones – Barcelona's Case", in Nieuwenhuijsen, M. and Khreis, H. (eds), *Integrating Human Health into Urban and Transport Planning – A Framework*, Springer, Cham. [Online] Available at: doi.org/10.1007/978-3-319-74983-9_8 [Accessed 28 March 2026].

UN – United Nations (2015), *Transforming our World – The 2030 Agenda for Sustainable Development*, document A/RES/70/1. [Online] Available at: sustainabledevelopment.un.org/index.php?page=viewandtype=111andnr=8496andmenu=35 [Accessed 28 March 2026].

UN – United Nations (1992), United Nations Framework Convention on Climate Change. [Online] Available at: unfccc.int/resource/docs/convkp/conveng.pdf [Accessed 28 March 2026].

UN-Habitat – United Nations Human Settlements Programme (2022), *Envisaging the Future of Cities – World Cities Report 2022*. [Online] Available at: unhabitat.org/sites/default/files/2022/06/wcr_2022.pdf [Accessed 28 March 2026].

Valente, R., Mozingo, L. A., Bosco, R. and Giacobbe, S. (2024), "Gestione integrata delle risorse naturali in contesti urbani sostenibili | Integrated natural resource management in sustainable urban context", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 15, pp. 180-189. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/15142024 [Accessed 28 March 2026].

Zhao, Z. and Shaw, R. (2025), "Nature-based ESG solutions – An analytical overview", in *Peace and Sustainability*, vol. 1, issue 2, article 100015, pp. 1-11. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.nerpsj.2025.100015 [Accessed 28 March 2026].

Zomer, R. J., Neufeldt, H., Xu, J., Ahrends, A., Bossio, D., Trabucco, A., van Noordwijk, M. and Wang, M. (2016), "Global tree cover and biomass carbon on agricultural land – The contribution of agroforestry to global and national carbon budgets", in *Scientific Reports*, vol. 6, article 29987, pp. 1-12. [Online] Available at: doi.org/10.1038/srep29987 [Accessed 28 March 2026].

ARCHITECTURE
Research & Experimentation

AGATHÓN – International Journal of Architecture, Art and Design | n. 19 | 2026 | pp. 94-117
ISSN print: 2464-9309 – ISSN online: 2532-683X | doi.org/10.69143/2464-9309/1962026

Article Info

Received 15 March 2026
Revised 16 April 2026
Accepted 20 April 2026
Published 30 June 2026

BORGHI COME INFRASTRUTTURE DI CURA
Metaprogetto per l'Alzheimer nelle aree interne

BORGHI AS CARE INFRASTRUCTURES
A metaproject for Alzheimer's disease in inland areas

Teresa Villani, Anna Mezzalana

Abstract

Il contributo indaga il potenziale dei borghi in via di spopolamento perché possano diventare infrastrutture territoriali di cura per persone con Alzheimer nelle fasi iniziali, facendo fronte all'invecchiamento della popolazione, alle disuguaglianze nell'accesso ai servizi sanitari e alla necessità di riutilizzare il Patrimonio edilizio inutilizzato, contribuendo alla rigenerazione sostenibile delle aree interne e al benessere delle comunità locali. Lo studio mira a verificare la trasferibilità di modelli residenziali innovativi per la demenza nei piccoli insediamenti. La ricerca utilizza un approccio analitico-comparativo con casi studio, combinando un modello ambientale-comportamentale e una progettazione basata sulle evidenze, per identificare ricorrenze spaziali e organizzative. Questi risultati vengono tradotti in criteri metaprogettuali per strutture socioassistenziali diffuse, applicati al Borgo di Cicignano (RI).

This paper investigates the potential of depopulating 'borghi' to function as territorial care infrastructures for people with Alzheimer's disease in the early stages. It addresses population ageing, inequalities in access to healthcare services, and the need to reuse underutilised built heritage, while contributing to the sustainable regeneration of inland areas and to the well-being of local communities. The study aims to verify the transferability of innovative residential models for dementia to small-scale settlements. It adopts an analytical-comparative approach based on case studies, integrating an environmental-behavioural model with evidence-based design to identify recurring spatial and organisational patterns. These results are translated into meta-design criteria for distributed socio-care facilities, which are subsequently applied to Borgo di Cicignano (RI).

Keywords

rigenerazione dei borghi, ambienti per persone con Alzheimer, welfare di prossimità, architetture per la cura, progettazione basata su evidenze

borghi regeneration, environments for people with Alzheimer's disease, proximity welfare, healthcare architecture, evidence-based design

Teresa Villani, Architect and PhD, is an Associate Professor of Technological and Environmental Design of Architecture at the Department of Planning, Design and Architecture Technology, 'Sapienza' University of Rome (Italy). She is affiliated with the Inter-University Research Centre TESIS. She conducts research in public services, focusing on the development of methodologies and tools for the control of building and environmental quality, planning, the design of territorial services for health and well-being, and technologies for social innovation in the built environment. E-mail: teresa.villani@uniroma1.it

Anna Mezzalana, Architect at the 'Centro per l'Autonomia' in Rome (Italy), conducts design experimentation in the field of environmental adaptations for people with disabilities. She is specialised in Universal Design, accessibility, smart home solutions and the facilitation of participatory processes. E-mail: a.mezzalana@centroperlautonomia.it

Il progressivo spopolamento dei borghi e delle aree interne rappresenta una criticità rilevante nel contesto italiano ed europeo. Tali territori sono interessati da processi di marginalizzazione demografica, economica e infrastrutturale che si traducono in una progressiva riduzione dei servizi essenziali, nell'abbandono del Patrimonio edilizio e nell'indebolimento delle reti sociali locali (Barbera, Cersonimo and De Rossi, 2022; Baró Zarzo, Poyatos Sebastián and Martínez Martínez, 2020).

In Italia il fenomeno assume una rilevanza endemica, interessando estese porzioni di territorio e incidendo profondamente sugli equilibri demografici e socioeconomici: le aree interne coprono circa il 60% del territorio nazionale, ma ospitano meno di un quarto della popolazione residente, configurandosi come territori caratterizzati da fragilità strutturali, ma anche da potenziali risorse per strategie di rigenerazione territoriale sostenibile (Brignoni et alii, 2023), la cui attuazione implica l'integrazione di competenze, strumenti e approcci multidisciplinari (Carrosio, 2019).

Tale direzione è stata ripresa anche nelle Linee Guida 2021-2027 del Piano Strategico Nazionale delle Aree Interne (PSNAI) che riconosce i territori marginali non solo come ambiti di intervento per contrastare il declino demografico, ma anche come presidi territoriali e contesti privilegiati per sperimentare politiche di sviluppo locale (Presidenza del Consiglio dei Ministri – Dipartimento per le politiche di coesione e per il Sud, 2021), attraverso un approccio centrato sui contesti, fondato sulla costruzione di progetti territoriali integrati.

Tuttavia la progressiva rarefazione dei servizi essenziali e la crescente distanza dalle infrastrutture sanitarie accentuano le disuguaglianze territoriali, con effetti diretti sulla qualità della vita delle comunità e sull'accesso equo ai servizi per la salute (Piazzoni and Terraneo, 2025). Le disparità territoriali possono essere interpretate sia nella loro dimensione spaziale, legata alla distribuzione dei servizi e alla configurazione degli assetti insediativi, sia nella dimensione sociale, relativa alla capacità dei territori di sostenere reti relazionali e forme di supporto comunitario (Fiorini et alii, 2025).

Parallelamente alle fragilità che caratterizzano i borghi e le aree interne si affiancano quelle demografiche legate all'invecchiamento della popolazione e alla crescente incidenza delle patologie neurodegenerative nella popolazione anziana, tra cui le diverse forme di demenza e in particolare l'Alzheimer. La diffusione di queste patologie ha assunto dimensioni rilevanti, configurandosi come una delle principali sfide sociali e sanitarie delle società contemporanee. Secondo l'Organizzazione Mondiale della Sanità (WHO, 2021) oltre 55 milioni di persone nel mondo convivono con una forma di demenza e si stima che tale numero possa raggiungere 139 milioni nel 2050.

L'Alzheimer rappresenta la forma più diffusa, responsabile di circa il 70% dei casi di demenza, con implicazioni non solo per i sistemi sanitari, ma anche per l'organizzazione degli ambienti di vita e dei modelli di assistenza (Long, Benoist and Weidner, 2023). In Italia, secondo l'Osservatorio Demenze dell'Istituto Superiore di Sanità (2024), le persone che sono affette da demenza sono circa 1.200.000, di cui circa 600.000 con diagnosi di Alzheimer. L'impatto della malattia non riguarda esclusivamente le persone direttamente colpite dalla patologia, ma si estende a una vasta rete di familiari e caregiver, stimati in circa 4 milioni, che ne assicurano l'assistenza quotidiana. Questa condizione evidenzia la crescente pressione sui sistemi di welfare e l'inadeguatezza dei modelli assistenziali istituzionalizzati, il che richiede nuove soluzioni territoriali e comunitarie per i luoghi di cura.

Numerosi studi hanno evidenziato come i modelli tradizionali di assistenza risultino spesso inadeguati a rispondere ai bisogni delle persone affette da demenza, soprattutto nelle fasi iniziali della malattia, quando il mantenimento dell'autonomia e delle relazioni sociali costituisce un fattore determinante per la qualità della vita e le condizioni di salute (Amodio, 2021; Marquardt and Schmieg, 2009; Marquardt, Bueter and Motzek, 2014). Questa crescente consapevolezza ha orientato la ricerca verso il ruolo dell'ambiente costruito nel sostenere i processi di cura e nel favorire il mantenimento delle capacità residue delle persone con demenza.

Negli ultimi decenni il dibattito scientifico ha infatti riconosciuto in modo sempre più esplicito il ruolo dell'ambiente costruito come determinante della salute e del benessere delle persone (Rao et alii, 2007; Fazeli Dehkordi, Khatami and Ranjbar, 2022): l'ambiente fisico può influenzare i comportamenti, le percezioni e gli stati emotivi degli individui, contribuendo alla prevenzione delle malattie croniche e al miglioramento della qualità della vita (Setola and Borgianni, 2025). In particolare, nel campo della progettazione degli ambienti di cura, l'architettura è sempre più chiamata a integrare dimensioni sanitarie, psicologiche e sociali in soluzioni in grado di promuovere la salute e il benessere nelle comunità.

Su questi presupposti si fonda il quadro teorico di riferimento della ricerca condotta, costituito dall'Evidence-Based Design (EBD), dal Neuro-Environmental Design e dal modello Environment-Behaviour (E-B), che interpretano lo spazio costruito come un dispositivo capace di sostenere i processi terapeutici e incidere sulle dinamiche comportamentali (Ulrich et alii, 2010; Attaianese, Barilà and Perillo, 2025; Zeisel, Hyde, and Levkoff, 1994). Nello specifico caso delle persone affette da demenza tali approcci dimostrano come configurazioni spaziali riconoscibili, ambienti domestici e percorsi facilmente leggibili possano migliorare l'orientamento, ridurre lo stress e sostenere le capacità residue degli utenti (Day, Carreon and Stump, 2000; Fleming et alii, 2017).

Su queste basi teoriche si sono sviluppati negli ultimi anni modelli innovativi di assistenza di piccole dimensioni, tra cui i cosiddetti 'dementia villages' o i modelli di 'small-scale living', che riproducono ambienti urbani familiari all'interno di luoghi protetti e simili a contesti di vita reale (Verbeek et alii, 2009; Krier et alii, 2023). Tali modelli hanno dimostrato come la qualità dell'ambiente costruito possa contribuire in modo significativo al benessere degli ospiti, favorendo autonomia, relazioni sociali e continuità delle pratiche quotidiane, anche attraverso configurazioni spaziali più flessibili, accessibili e inclusive (Battaino, Fossati and Marconi, 2025).

Dal quadro delle dinamiche sopra descritte si delinea una possibile convergenza tra politiche di rigenerazione territoriale e modelli innovativi di welfare di prossimità. I borghi spopolati, caratterizzati da una scala urbana contenuta, dalla riconoscibilità spaziale e da una dimensione relazionale consolidata, possono infatti rappresentare contesti insediativi particolarmente compatibili con le esigenze delle persone affette da disturbi neurocognitivi. La struttura compatta degli insediamenti storici, la presenza di spazi pubblici protetti e la prossimità tra abitazioni e servizi promuovono l'orientamento, la sicurezza e la socialità, configurandosi come elementi fondamentali nella progettazione di ambienti rispondenti ai bisogni delle persone con demenza.

La convergenza tra la fragilità delle persone e dei territori può così trasformarsi in un'opportunità progettuale, sviluppando modelli di residenzialità innovativa capaci da un lato di migliorare la qualità di vita delle persone con Alzheimer nelle fasi iniziali della patologia, dall'altro di attivare processi di rigenerazione socio-territoriale in contesti oggi marginalizzati. Su tali presupposti si fonda il presente contributo che intende interpretare i borghi come infrastrutture di cura diffusa, ovvero sistemi insediativi capaci di integrare abitare, assistenza e relazioni di prossimità all'interno del tessuto urbano esistente (Ricci, Battisti and Monardo, 2014). Questo approccio supera il modello delle strutture sanitarie dedicate, organizzate come villaggi simulati, proponendo invece una cura territoriale basata sul riuso e sull'adattamento del Patrimonio edilizio e sull'attivazione delle risorse sociali e spaziali locali. A partire quindi dal dibattito scientifico relativo alla rigenerazione dei borghi e a soluzioni insediative innovative per la demenza l'obiettivo del presente studio è verificare la trasferibilità di esperienze progettuali assimilabili ai 'dementia-village' e 'small-scale living' al contesto dei borghi, individuando caratteristiche spaziali, organizzative e prestazionali ricorrenti, utili a definire indicazioni metaprogettuali per una struttura socioassistenziale diffusa.

In coerenza con tale obiettivo la ricerca si sviluppa attorno alle seguenti domande: a) In che misura i modelli di assistenza per la demenza riconducibili ai 'dementia villages' e ai modelli di 'small-scale living' risultano trasferibili al contesto dei borghi e delle aree interne? b) Quali caratteristiche spaziali, organizzative e prestazionali dei modelli analizzati, nonché quali strategie metaprogettuali di adattamento del Patrimonio edilizio, sono determinanti per configurare, nei contesti storici, ambienti favorevoli alle persone con Alzheimer nelle fasi iniziali della malattia? c) In che modo il tessuto insediativo dei borghi può essere reinterpretato come infrastruttura di cura diffusa, contribuendo al contempo al benessere delle persone con demenza e ai processi di rigenerazione socio-territoriale?

Le domande trovano riscontro in una verifica applicativa attraverso cui la validità dell'impostazione proposta è stata testata sul Borgo di Cicignano (RI), al fine di valutarne la coerenza e l'adattabilità al tessuto insediativo storico. Attraverso un'analisi comparata di casi studio nazionali e internazionali di strutture per malati di Alzheimer e la definizione di un modello metaprogettuale, si intende dimostrare come l'architettura diffusa possa configurarsi come dispositivo spaziale e sociale capace di mediare tra cura, tutela del Patrimonio e rigenerazione territoriale.

A partire dal quadro teorico e metodologico delineato il paper si struttura in quattro parti che si articolano dalla definizione degli strumenti di indagine alla verifica applicativa del modello proposto. Una prima parte è dedicata alla metodologia e al protocollo analitico adottato, inteso come insieme strutturato di procedure di selezione dei casi, indicatori qualitativi, strumenti interpretativi e criteri decisionali, finalizzati a garantire la trasparenza e la replicabilità del percorso di ricerca. La seconda par-

te sviluppa un'analisi comparativa di casi studio nazionali e internazionali riconducibili ai modelli di 'dementia village' e 'small-scale living', finalizzata a individuare ricorrenze spaziali, tecnologiche e organizzative.

Su tali evidenze si basa la terza parte, volta a definire un modello metaprogettuale di infrastruttura di cura diffusa articolato in criteri di aggregazione, requisiti prestazionali e indicazioni per l'adattamento del Patrimonio edilizio esistente. La quarta parte comprende la verifica della trasferibilità del modello attraverso l'applicazione al Borgo di Cicignano (RI, Italia), analizzato alle diverse scale (urbana ed edilizia), cui segue, nelle conclusioni, la discussione dei risultati emersi, con le potenzialità e i limiti dell'approccio proposto in relazione ai processi di rigenerazione territoriale e ai modelli di welfare di prossimità.

Alla luce dell'articolazione delineata il presente studio non si limita all'analisi e sistematizzazione dei modelli di villaggi Alzheimer, ma propone un cambio di scala, di base insediativa e di paradigma, passando da strutture protette di nuova realizzazione al riuso adattivo del Patrimonio dei borghi come infrastruttura socio-territoriale di cura.

Metodologia | La ricerca adotta un approccio analitico-comparativo basato su casi studio, finalizzato alla costruzione di un modello metaprogettuale per strutture socioassistenziali destinate a persone affette da Alzheimer nelle fasi iniziali della malattia, da trasferire nei borghi. Il quadro teorico integra contributi dell'Environmental-Behaviour Model, dell'Evidence-Based Design e del Neuro-Environmental Design che interpretano l'ambiente costruito come supporto all'orientamento, al contenimento dei comportamenti di deambulazione casuale e alla promozione di autonomia e sicurezza. La metodologia combina inoltre analisi spaziali multiscalari per la costruzione di criteri progettuali trasferibili, da verificare mediante l'applicazione a un caso pilota (Fig. 1).

La prima fase prevede l'analisi comparativa di strutture nazionali e internazionali riconducibili ai modelli di 'dementia-village' o a configurazioni di 'small-scale living'. La selezione dei casi studio è effettuata sulla base di criteri specifici: target di utenza costituito da persone affette da Alzheimer nelle fasi lieve o moderata della malattia; organizzazione degli spazi basata su configurazioni insediative riconoscibili e simili a quelli della vita quotidiana; presenza di servizi sanitari, riabilitativi e di socializzazione integrati; disponibilità di documentazione progettuale e gestionale. L'analisi comparativa consente di individuare assetti spaziali, modelli organizzativi e soluzioni ambientali e tecnologiche utili alla definizione di un modello di infrastruttura di cura diffusa nei borghi.

La seconda fase prevede un'analisi a scala urbana per verificare la compatibilità morfologica del borgo con i requisiti ambientali necessari per le persone con demenza. L'analisi integra criteri derivati dall'Environmental-Behaviour Model (Zeisel, Hyde, and Levkoff, 1994), tra cui orientamento, leggibilità degli spazi, controllo delle uscite e gestione della deambulazione casuale, con strumenti di analisi configurazionale derivati dalla metodologia Space Syntax (Hillier, 2007), che interpreta lo spazio attraverso grafici e metriche di integrazione visiva, connettività e intelligibilità.

La terza fase è dedicata all'analisi a scala edilizia. I requisiti ambientali sono tradotti in criteri progettuali relativi all'accessibilità e alla protesicità degli spazi – secondo i principi dell'Universal Design (Preiser and Ostroff, 2001) e dell'Inclusive Design (Coleman, 1994) – e all'integrazione di tecnologie domotiche di supporto alle persone con demenza (Chen et alii, 2025). In questa prospettiva la propensione di uno spazio a favorire il movimento, soprattutto per le persone più fragili, dipende non solo dall'usabilità e dal rapporto conformativo-dimensionale (spazio accessibile), ma anche dalla capacità dello spazio di essere realtà esperienziale (rapporto psicofisico-metabolico) e 'protesico', in grado cioè di stimolare attività determinanti per la salute (Chaza, Revelli and Cellucci, 2024). L'analisi considera inoltre strategie di riuso e retrofit del Patrimonio edilizio esistente e interventi di efficientamento energetico, al fine di garantire sostenibilità ambientale e riduzione del consumo di suolo.

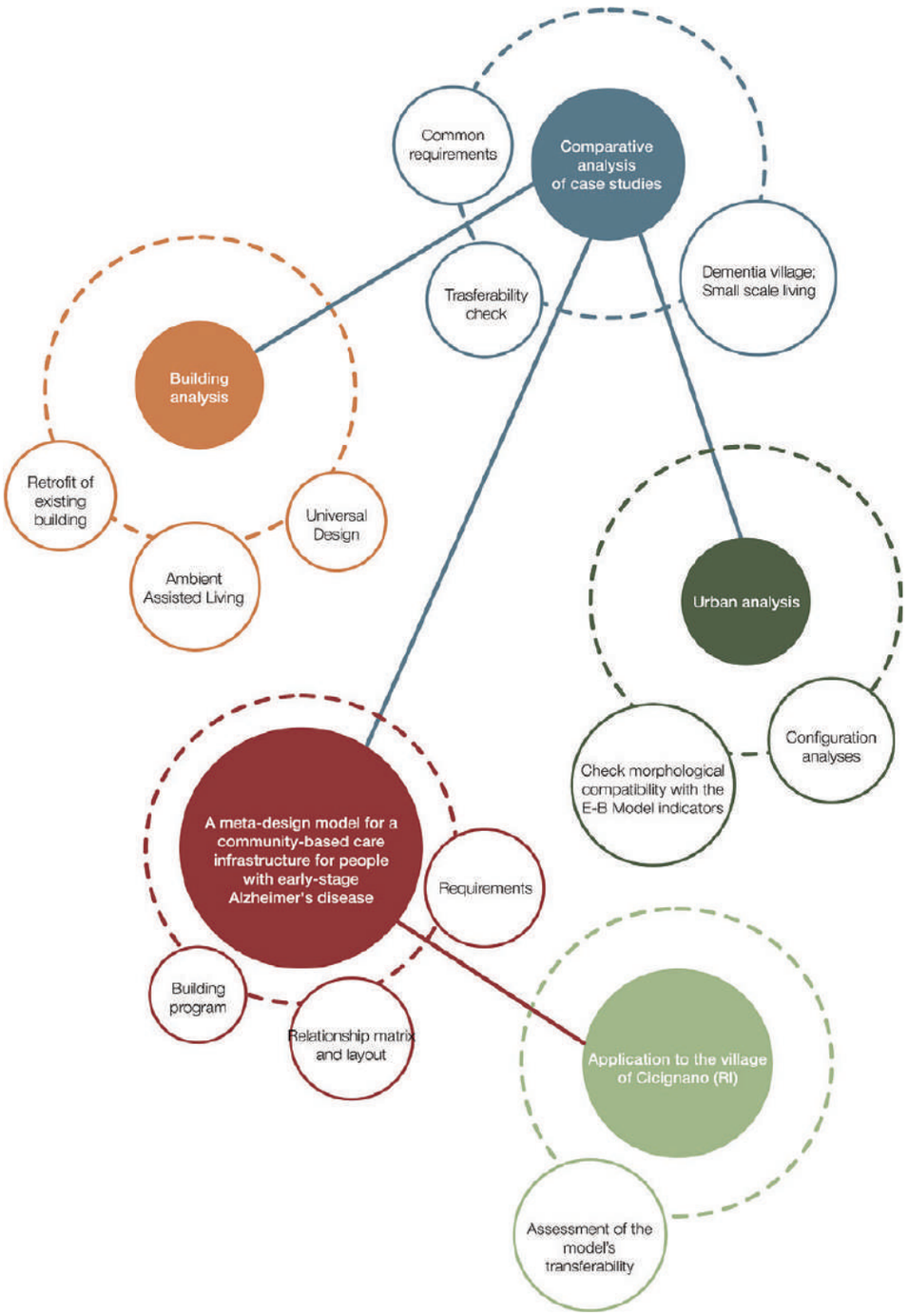


Fig. 1 | Structure of the methodology: preliminary analyses, construction of the meta-project model and verification of transferability within a real context (credit: the research group, 2026).

E-B Model Critical performance criteria	Definition	Parameters	High compliance	Low compliance
1. Exit control	Boundary conditions of each special care unit; the surrounding walls, fences, doors and how they are locked or otherwise limit and allow people to come and go	Immediacy of control Unobtrusiveness	Secured exits with little or no delay in control, designed so that residents are unaware of exits, locks, and security devices	Exits with few controls and slow response time: residents recognise there are exits with a lack of barriers
2. Wandering paths	Circulation space residents use for wandering and moving around	Continuity Wayfinding	Clearly linked pathways with visual cues and events along the way	Unvarying, boring, confusing dead-end corridors
3. Individual away places	Spaces, primarily bedrooms, assigned to and mostly used by a limited number of residents	Privacy Personalization	Private bedrooms furnished and decorated by residents' own belongings	Wards with no chance for personalisation
4. Common space	Sizes, relationships and qualities of spaces used by all residents in the special care unit	Quantity Variability	Several activity spaces highly differentiated by function, such as therapeutic kitchen, dining and activities	Only one undifferentiated common area
5. Outdoor freedom	Residents' access to common areas out of doors and the way these places support residents' needs	Availability Support	Adjacent outdoor space on the same level with doors open to the unit, and designed to support resident functioning	Outdoor space not well designed and inaccessible except on an infrequent basis
6. Residential character	Degree to withch the size of the special care unit reflects a large family space and the degree to withch the special care unit uses residential furnishings, design features, and personal objects	Size Familiarity	7 to 15 residents in the residence, small rooms, and familiar furniture, furnishing and routines	A unit with over 30 residents as well as institutional, unfamiliar interior features
7. Autonomy support	The way in withch the facility encourages and supports residents to use their remaining faculties to carry out basic tasks and activities independently and with dignity	Safety Environmental prosthetics	Interiors that are safe and prosthetic, enabling residents to use their remaining faculties to take care of themselves	Hazardous interiors which require staff to help residents carry out most tasks and activities
8. Sensory comprehension	The degree to withch the sensory environment, acoustic, visual, thermal, odour and kinesthetic environments, in all spaces, may confuse residents	Noise management Comprehensibility	Moderate amounts of sounds, sights, smells, and other experiences, all of which make sense to residents	Noisy and confusing, or grossly understimulating, but with few cues of stimuli meaningful to residents

Tab. 1 | Environment-Behaviour (E-B) Model: critical performance criteria for special Alzheimer care units, with definition of reference parameters and qualitative descriptors of high and low compliance (source: Zeisel, Hyde and Levkoff, 1994; adapted by A. Mezzalana, 2026).

La quarta fase raccoglie i risultati delle analisi precedenti per definire un modello metaprogettuale di struttura socioassistenziale diffusa, articolato in criteri di aggregazione residenziale, dotazione minima di servizi e requisiti ambientali e tecnologici. Il modello è tradotto in un programma edilizio, in un layout organizzativo-funzionale e nell'individuazione di requisiti prestazionali e soluzioni correlate.

La quinta e ultima fase consiste nell'applicazione del modello metaprogettuale al Borgo di Cicignano (RI), selezionato come caso pilota per la sperimentazione della compatibilità tra i requisiti ambientali delle strutture per Alzheimer e le caratteristiche morfologiche dei borghi. Tale applicazione consente di esplicitare le prime riflessioni sulla valutazione della trasferibilità del modello.

Quadro analitico e strumenti operativi | La presente sezione sintetizza, per ogni fase della metodologia, i dataset, i criteri di selezione, le variabili qualitative, gli strumenti analitici, gli indicatori e le regole decisionali.

Per la prima fase, in linea con approcci consolidati nella letteratura internazionale sugli ambienti per la demenza (Gan et alii, 2022; Ghamari et alii, 2025) e negli studi comparativi basati su casi studio, il protocollo di selezione dei casi studio è stato strutturato in quattro passaggi. In primo luogo sono stati definiti i criteri di inclusione, finalizzati a individuare modelli insediativi coerenti con l'obiettivo di ricerca, tra cui: a) target di utenza costituito da persone con Alzheimer nelle fasi iniziali o moderate della malattia; b) configurazione spaziale riconducibile a modelli di 'dementia village' o 'small-scale living', con organizzazione in unità abitative di piccola scala, integrate in un sistema insediativo unitario; c) presenza di servizi sanitari, riabilitativi e di socializzazione integrati; d) adozione di un approccio orientato alla riproduzione di condizioni di vita quotidiana; e) disponibilità di documentazione progettuale, gestionale o scientifica adeguata a supportare un'analisi comparativa.

Parallelamente sono stati definiti criteri di esclusione più stringenti per garantire l'omogeneità e la comparabilità del campione. Sono stati esclusi: a) modelli riconducibili a residenze sanitarie assistenziali tradizionali o a strutture realizzate in ambito ospedaliero, caratterizzate da un'organizzazione prevalentemente sanitaria; b) interventi privi di una chiara configurazione insediativa o non riconducibili a logiche di tipo 'villaggio' o 'small-scale'; c) strutture destinate a fasi avanzate della malattia con elevata intensità assistenziale, non coerenti con l'obiettivo di mantenimento dell'autonomia; d) casi sperimentali non realizzati o non operativi; e) esempi per i quali non fosse disponibile una documentazione sufficiente, verificabile o confrontabile (assenza di dati spaziali, funzionali, gestionali).

La selezione è stata quindi condotta attraverso una ricognizione sistematica della letteratura scientifica e delle fonti documentali pubblicate nel periodo compreso tra gennaio e settembre 2025, includendo database accademici internazionali (Google Scholar, Scopus e Web of Science), nonché report istituzionali, pubblicazioni tecniche e documentazione progettuale. Sono stati privilegiati casi frequentemente citati nel dibattito disciplinare e riconosciuti come buone pratiche a livello nazionale e internazionale. La selezione è stata ulteriormente affinata attraverso criteri di pertinenza insediativa, distinguendo tra casi nazionali (scelti per la loro compatibilità dimensionale, organizzativa e gestionale con il modello di infrastruttura di cura diffusa nei borghi) e casi internazionali, assunti come riferimenti emblematici per l'innovazione spaziale, ambientale e assistenziale. Una volta definito il campione i casi studio sono stati organizzati in un dataset analitico, articolato secondo una griglia comparativa che include: contesto e consistenza della struttura, numero di ospiti e relativa fase della malattia, caratteristiche morfologiche e insediative, aggregazioni spaziali, comunicatività ambientale e strategie di orientamento, modello gestionale, approccio assistenziale e finanziamenti. Tale struttura ha consentito di rendere confrontabili contesti differenti e di individuare ricorrenze, varianti e condizioni di trasferibilità.

Nella seconda fase i dataset di riferimento, derivati dall'Environmental-Behaviour Model (Zeisel, Hyde, and Levkoff, 1994) sono stati rielaborati e trasferiti alla scala urbana, traducendo i 'Critical Performance Criteria' in variabili osservabili e indicatori spaziali, utili alla verifica della compatibilità morfologica del borgo con requisiti ambientali, in grado di supportare orientamento, autonomia e benessere delle persone con demenza, articolati come segue:

– Controllo delle uscite (immediatezza del controllo; non visibilità delle uscite), per valutare la capacità dell'ambiente di garantire sicurezza attraverso dispositivi di controllo discreti e non stressanti, evitando al contempo stimoli visivi che inducano

Name	Alzheimer Village 'Il Paese Ritrovato'	Village Emmanuele	The Casa Paese	The Hogeweyk Dementia Village	Village Landais Alzheimer	Furuset Hageby Alzheimer Village
Localization	Monza (MB), Lombardy, Italy	Roma (RM), Lazio, Italy	Cicala (CZ), Calabria, Italia	Weep, Netherlands	Dax, France	Oslo, Norwey
Year of construction	2016	2012	2018	First ideas in 1992	2017/2018	2018
Year of inaguration	2018	2018	2022	2009	2020	2024
Category of intervention	New construction	New construction	Renovation of existing structure	New construction	New construction	New construction
Site area (m^2)	ca. 14.000	ca. 10.000	ca. 1.200	15.310	50.000	13.500
Residential area (m^2)	3.360	3.500		12.272	4.800	11.150
Number of guests	64	84 residential guests, 20 day center guests	16	162/189	120	112
Functional model	Neighborhood within the city	Alzheimer Village	Alzheimer Village	Alzheimer Village	Alzheimer Village	Alzheimer Village Garden city
Stage of Alzheimer's disease						
Mild						
Mild-moderate						
Mild and moderate		X				
Moderate-severe						
Severe				X		
Various stages	X		X		X	X
Morphological model	 Integrated protected neighborhood	 Introverted, self-sufficient enclave	 Integrated protected neighborhood	 Introverted, self-sufficient enclave		 Cores integrated into the landscape
Management model	 Social welfare facility	 Social welfare facility	 Participatory community structure	 Healthcare facility	 Healthcare facility	 Healthcare/social welfare facility
Financing	 Private facility	 Private facility	 Private facility	 Accredited private facility	 Public facility	 Public facility

Fig. 2 | General data of the case studies and the morphological, managerial and financial models that characterise them (credit: the research group, 2026).

comportamenti di fuga;
– Percorsi di vagabondaggio (continuità; wayfinding), per individuare la presenza di sistemi di percorrenza continui, leggibili e privi di interruzioni, che favoriscano il movimento spontaneo e l'orientamento;
– Camera di degenza (privacy; personalizzazione), per verificare la possibilità di disporre di spazi individuali riconoscibili e adattabili, in grado di sostenere identità e senso di appartenenza;
– Spazi comuni (quantità; variabilità), per acquisire la disponibilità e la diversificazione di ambienti collettivi che supportino differenti livelli di socialità e attività;
– Libertà esterna (disponibilità; supporto), per individuare gli elementi di accessibilità a spazi aperti sicuri e attrezzati, che consentano l'esperienza dell'esterno in condizioni controllate;
– Residenzialità (dimensione; familiarità), in termini di configurazione spaziale a scala domestica, riconoscibile, capace di evocare ambienti di vita quotidiana;
– Supporto all'autonomia (sicurezza; protesicità), per valutare soluzioni ambientali che compensino le difficoltà cognitive, riducendo rischi e facilitando l'uso dello spazio;
– Comprensione sensoriale (gestione degli stimoli; comprensibilità), in termini di controllo e qualità degli stimoli percettivi (visivi, acustici, tattili) per garantire ambienti leggibili e non disorientanti.

Ai requisiti così delineati è stata associata una struttura di valutazione qualitativa della rispondenza e della conseguente compatibilità morfologica, finalizzata a verificare il grado di corrispondenza tra i caratteri spaziali del borgo e l'insieme dei requisiti considerati (Tab. 1). Alla scala urbana la compatibilità morfologica è stata ulteriormente indagata mediante parametri operativi derivati da analisi configurazionali, con particolare riferimento agli indicatori spaziali calcolati con il software DepthmapX. Tali parametri, tra cui l'analisi della visibilità, della profondità di passo e delle isoviste, sono stati assunti come supporto interpretativo per la discussione delle proprietà morfologiche, visuali e relazionali del sistema urbano, articolati come segue:

– Analisi della visibilità (ampiezza visuale; intensità percettiva), valutabile attraverso la misurazione della quantità di spazio visibile da ciascun punto dell'ambiente, distinguendo tra aree ad ampia visuale e aree a visuale ristretta in relazione alla presenza e alla distanza degli elementi costruttivi circostanti; la rispondenza è considerata alta in presenza di visibilità ridotta;
– Analisi della profondità di passo (accessibilità; connettività), da valutare mediante la rappresentazione del numero di connessioni o passi necessari per raggiungere un nodo da un altro all'interno del sistema spaziale; una profondità di passo elevata, con un elevato numero di svolte per raggiungere il nodo, indica condizioni di scarsa accessibilità e di difficoltà di raggiungimento, mentre una profondità di passo ridotta, con un numero di svolte contenute è indicativa di prossimità e facilità di movimento tra i nodi considerati; la rispondenza è considerata alta in presenza di bassa profondità di passo;
– Analisi delle isoviste (percezione spaziale; leggibilità contestuale), da valutare attraverso la rappresentazione dell'area visibile da uno specifico punto di osservazione all'interno del tessuto urbano; le isoviste consentono di capire in che misura la configurazione spaziale influisce sulla percezione e sull'uso dello spazio, evidenziando condizioni favorevoli o critiche per l'orientamento e la sicurezza di movimento.

La valutazione dei sistemi è stata articolata secondo una scala ordinale dicotomica (rispondenza alta–bassa), i cui livelli sono stati esplicitati mediante descrittori qualitativi, al fine di garantire coerenza interpretativa, tracciabilità di giudizio e replicabilità dell'analisi. Nello specifico rispondenza 'alta' identifica configurazioni morfologiche coerenti con i criteri considerati, mentre 'bassa' individua condizioni di debole compatibilità o di mancata coerenza, consentendo una lettura comparativa dei contesti che si intendono valutare.

La terza fase è dedicata all'analisi a scala edilizia. I requisiti sono stati tradotti in un dataset articolato in categorie tematiche (accessibilità, protesicità, integrazione tecnologica, sostenibilità), a cui sono associate variabili osservabili e criteri di valutazione qualitativa riferiti alla configurazione degli spazi e alle prestazioni degli edifici disponibili. La verifica è stata condotta attraverso descrittori qualitativi e condizioni di rispondenza, finalizzati a interpretare il grado di coerenza tra assetto edilizio e quadro dei requisiti, supportando una lettura comparativa delle unità abitative analizzate. L'analisi ha integrato inoltre variabili relative al riuso e al retrofit del Patrimonio edilizio esistente e agli interventi di efficientamento energetico, includendo il criterio di minimo intervento, inteso come limitazione delle trasformazioni alle sole modifiche necessarie a garantire adattabilità, sicurezza, accessibilità e orientamento, nel rispetto dei caratteri esistenti.

La quarta fase, finalizzata alla costruzione del modello metaprogettuale e alla verifica della sua trasferibilità, organizza in un dataset di sintesi le ricorrenze emerse dall'analisi dei casi studio, in cui ciascun elemento è descritto in base alla propria incidenza e alle condizioni di adattabilità a contesti differenti. Su questa base il passaggio dalle ricorrenze al modello è stato condotto attraverso un processo di astrazione e sintesi, volto a ricondurre a principi generali le soluzioni specifiche e a renderle indipendenti dal singolo caso. Gli elementi così selezionati sono stati quindi riorganizzati in un dataset metaprogettuale, strutturato come insieme di principi e strategie articolati in tre passaggi: 1) elaborazione del programma edilizio, inteso come definizione delle funzioni, delle dotazioni spaziali e delle relazioni d'uso; 2) definizione del layout organizzativo-funzionale, relativo alla configurazione e all'articolazione degli spazi e dei percorsi; 3) individuazione dei requisiti prestazionali e delle soluzioni correlate.

La quinta fase, dedicata alla verifica applicativa del modello metaprogettuale su un caso pilota è condotta seguendo un protocollo di trasferibilità che integra in modo sistematico i dataset definiti nelle fasi precedenti e si caratterizza come procedura multilivello, articolata in:
– Verifica della configurazione, basata sul confronto tra gli elementi morfologici del modello e le condizioni del contesto, utilizzando il dataset urbano derivato dalla seconda fase, in cui i 'Critical Performance Criteria' dell'E-B model sono stati tradotti in variabili e indicatori spaziali; la verifica si avvale degli strumenti di analisi configurazionale e dei parametri operativi calcolati tramite DepthmapX, nonché degli indicatori qualitativi relativi a continuità dei percorsi, controllo degli accessi, leggibilità e organizzazione spaziale, integrando inoltre le ricorrenze morfologiche emerse dal dataset comparativo dei casi studio (fase 1 e fase 4), quali struttura a villaggio, percorsi ad anello e presenza di spazi aperti protetti;
– Verifica funzionale, fondata sulla corrispondenza tra programma edilizio e risorse spaziali disponibili nel contesto, verificando aggregazione, organizzazione e modalità d'uso definite nel modello metaprogettuale (fase 4) e la rispondenza al dataset analitico dei casi studio (fase 1), che include variabili relative a servizi, modelli gestionali, approccio assistenziale e forme di socializzazione; tale verifica integra le ricorrenze funzionali individuate, valutando la coerenza tra le soluzioni proposte e gli assetti organizzativi ricorrenti (ad esempio articolazione in nuclei, integrazione dei servizi, attività terapeutiche e sociali), nonché la loro adattabilità alle condizioni del caso pilota;
– Verifica prestazionale, condotta mediante l'associazione tra requisiti e soluzioni progettuali, utilizzando il dataset edilizio definito in fase 3, articolato in categorie tematiche (accessibilità, protesicità, integrazione tecnologica, sostenibilità) e integrato con le relazioni tra requisiti prestazionali e soluzioni tecniche; la verifica considera le condizioni di sicurezza, accessibilità, orientamento, supporto all'autonomia e qualità sensoriale, attraverso variabili osservabili e descrittori qualitativi, includendo anche le strategie di riuso e retrofit del patrimonio edilizio e il criterio di minimo intervento.

La valutazione è supportata da una mappatura delle corrispondenze tra le componenti del modello e le caratteristiche del caso pilota integrando: la frequenza delle ricorrenze degli elementi derivanti dai casi studio analizzati, il grado di adattabilità rispetto ai vincoli dimensionali, configurazionali e operativi di contesto e la coerenza tra variabili osservate, indicatori e soluzioni progettuali, come definiti nei dataset analitici delle diverse fasi.

Analisi dei casi studio | L'analisi prende in esame casi studio di modelli residenziali innovativi dedicati a persone con demenza, assunti come riferimento per l'elaborazione del modello metaprogettuale; tali esperienze, pur collocandosi in contesti geografici e istituzionali differenti, condividono l'obiettivo di superare il modello tradizionale della residenza sanitaria assistenziale, privilegiando configurazioni spaziali e organizzative orientate alla riproduzione di condizioni di vita ordinaria, il più possibile simili a quelle domestiche e comunitarie (Verbeek et alii, 2009). La selezione dei casi studio ha seguito il protocollo di campionamento definito nella fase 1) ed è basata su due chiavi di lettura complementari: da un lato sono state individuate strutture italiane scelte per la loro coerenza con la proposta di infrastruttura di cura diffusa da collocare nei borghi in termini di dimensioni, struttura organizzativa e modelli di finanziamento; dall'altro sono stati considerati casi internazionali di particolare rilevanza nel dibattito disciplinare sulle architetture per la demenza (Quesada-García, Valero-Flores and Lozano-Gómez, 2024), assunti come riferimenti progettuali e assistenziali. La selezione è stata inoltre guidata da alcuni criteri riconducibili principalmente alla morfologia insediativa: tutti i casi analizzati presentano una struttura a villaggio chiuso, articolata in alloggi organizzati in nuclei abitativi (Fig. 2). Sul piano dei servizi e dell'approccio assistenziale sono state privilegiate strutture informali, capaci di ricreare dinamiche di vita quotidiana in contesti protetti con forte connotazione architettonica, caratterizzazione cromatica e un elevato grado di personalizzazione degli spazi. In ambito italiano vengono considerati tre esempi significativi.

La Casa Paese di Cicala (CZ) ha rappresentato un riferimento importante per la ricerca in quanto è una struttura realizzata in un piccolo borgo alle pendici della Sila, dedicata a persone con Alzheimer nelle fasi iniziali della malattia. La forte riconoscibilità degli spazi, ottenuta con l'uso di ambienti tematici, costituisce un punto di forza rilevante, in quanto concepiti per facilitare l'orientamento e sostenere la memoria degli ospiti (Fig. 3). Lo sviluppo della struttura all'interno di un unico edificio rappresenta tuttavia un limite significativo, in quanto riduce la possibilità di accedere a spazi aperti e limita la varietà delle attività quotidiane proponibili. Queste ultime risultano spesso ricondotte a scenari simulati che, nella loro configurazione attuale, si riducono a scenari dipinti sulle pareti piuttosto che a spazi fruibili.

Tale impostazione configura anche la principale criticità del caso studio rispetto a una prospettiva di trasferibilità: un progetto applicabile a contesti diversi deve garantire spazi autentici e attività reali, evitando come sostituto dell'esperienza diretta la simulazione, che rischia di impoverire la qualità dell'ambiente terapeutico invece di arricchirla. Gli elementi trasferibili a un modello generalizzato riguardano invece la scelta del borgo come contesto insediativo e soprattutto il principio della riconoscibilità spaziale, attraverso la differenziazione tematica degli ambienti, strategia efficace e replicabile in contesti di scala ridotta.

Il Paese Ritrovato di Monza è articolato in abitazioni, servizi e spazi collettivi organizzati secondo una logica di prossimità e di vita comunitaria che riproduce la struttura di un borgo con alloggi che si affacciano su spazi pubblici. Questa configurazione costituisce il principale punto di forza del modello: favorisce la capacità di autodeterminazione e di movimento in un ambiente protetto (Fig. 4), mentre il modello assistenziale, di tipo domestico sostiene l'autonomia residua, integrando il supporto de-



Fig. 3 | Interiors of the Casa Paese di Cicala (CZ): reproduction of services and everyday life contexts through the use of colour and evocative thematic elements supporting orientation and residents' memory (source: cfs.it).

gli operatori nelle attività quotidiane. I limiti sono marginali poiché le scelte progettuali risultano nel complesso coerenti con i requisiti di un ambiente terapeutico di qualità. La criticità principale emerge tuttavia in una prospettiva di generalizzazione: la struttura è realizzata ex novo, ricostruendo artificialmente ambienti a scala ridotta.

Gli elementi trasferibili a un modello generalizzato riguardano la struttura morfologica, coerente con quella dei borghi storici, e quindi direttamente replicabile, e il modello assistenziale, che integra gli operatori sanitari nella vita quotidiana degli ospiti in modo naturale e non intrusivo, configurandosi come strategia efficace e adattabile a contesti diversi.

Il terzo caso, il Villaggio Emanuele di Roma, si articola in unità abitative e spazi collettivi ispirati ai modelli internazionali del 'villaggio Alzheimer', finalizzati a garantire il mantenimento delle capacità residue, la sicurezza e la continuità delle pratiche di vita ordinaria per gli ospiti nelle fasi lievi e moderate della malattia. La strutturazione degli spazi secondo una logica di vita comunitaria e la qualità dell'accessibilità degli ambienti interni costituiscono elementi progettuali di rilievo.

I limiti emergono in relazione alla dimensione della struttura, maggiore rispetto agli altri casi studio considerati. L'assenza di una piazza centrale o di un elemento spaziale di riferimento riconoscibile compromette la leggibilità complessiva del sistema, rendendo più difficoltoso l'orientamento degli ospiti. A ciò si aggiunge la mancanza di una caratterizzazione tematica degli edifici che, in un contesto su scala più ampia, avrebbe potuto compensare la minore compattezza morfologica, fornendo punti di riferimento visivi e spaziali. Tali limiti configurano anche le principali criticità in una prospettiva di generalizzazione: un modello applicabile a borghi di dimensioni variabili dovrebbe prevedere tanto la presenza di un fulcro spaziale riconoscibile quanto una differenziazione morfologica o tematica degli edifici.

Gli elementi trasferibili riguardano la strutturazione e l'accessibilità degli ambienti interni, che rappresentano una strategia efficace e replicabile.

A livello internazionale lo studio prende in esame alcuni dei modelli più rappresentativi della sperimentazione della residenzialità per la demenza. Il De Hogeweyk Dementia Village (Weesp, Paesi Bassi) rappresenta uno dei primi esempi di villaggio Alzheimer, organizzato secondo stili di vita differenziati e fondato su un approccio salutogenico, in cui l'ambiente costruito diventa parte integrante del processo di cura. La capacità di riprodurre ambienti riconoscibili e tematicamente distinti, studiati per evocare contesti di vita ordinaria, costituisce il principale punto di forza del modello, che ha dimostrato l'efficacia terapeutica di un ambiente costruito intenzionalmente progettato per supportare orientamento, autonomia e benessere delle persone con demenza.

Il limite principale risiede nella dimensione della struttura, che ne rende difficile la replicazione diretta nel contesto delle aree interne italiane, caratterizzato da vincoli normativi, economici e morfologici incompatibili con interventi di tale scala. Gli elementi trasferibili riguardano il principio fondativo del villaggio Alzheimer: la differenziazione tipologica e tematica degli ambienti e l'integrazione tra spazi abitativi e collettivi secondo una logica di vita comunitaria; tutti elementi che costituiscono la base di riferimento per la definizione di un modello generalizzabile. Il Village Landais Alzheimer (Dax, Francia) propone un'organizzazione in quartieri residenziali con servizi condivisi e una forte integrazione paesaggistica, favorendo la continuità tra spazi abitativi e spazi aperti accessibili. Il progetto Furuset Hageby (Oslo, Norvegia) combina il modello del 'dementia-village' con i principi della città giardino, introducendo strategie di sostenibilità ambientale e valorizzando il rapporto con la natura quale elemento terapeutico e relazionale, nonché come funzione di landmark.

I due casi studio condividono un'impostazione progettuale fondata sull'integrazione tra spazi abi-



Fig. 4 | Paese Ritrovato di Monza: closed-village structure organised around a circular pathway connecting services and residences. The use of colour facilitates recognisability and spatial orientation (source: cooplameridiana.it).

tativi e ambiente naturale che costituisce un rilevante punto di forza. Tuttavia la dimensione degli interventi e la conseguente mancanza di una definizione chiara dei limiti dello spazio rappresentano un limite significativo: la permeabilità non controllata tra spazio interno ed esterno può generare disorientamento e aumentare il rischio di allontanamento. Questo aspetto configura anche la criticità principale in una prospettiva di generalizzazione: un modello applicabile a contesti diversi deve garantire che il rapporto con lo spazio aperto sia diretto, ma al contempo governato.

L'elemento trasferibile di maggiore rilevanza è il rapporto con la natura come risorsa terapeutica e di orientamento, da integrare tuttavia in una dimensione controllata e su scala contenuta, tale da preservarne i benefici senza introdurre le condizioni di rischio legate alla dispersione spaziale.

Il confronto tra queste esperienze consente di evidenziare alcuni requisiti di aggregazione spaziale e comunicatività ambientale, oltre ad aspetti funzionali e approcci assistenziali ricorrenti (Fig. 5). In primo luogo emerge il ricorso ad aggregazioni impostate secondo una logica insediativa di piccoli quartieri o villaggi, composti da unità abitative di dimensioni contenute e da spazi collettivi disposti lungo percorsi chiaramente riconoscibili: tale configurazione favorisce la costruzione di ambienti familiari e facilmente comprensibili, contribuendo a ridurre il disorientamento frequentemente associato alle strutture sanitarie tradizionali.

Un secondo elemento ricorrente riguarda l'integrazione tra le funzioni residenziali, i servizi e gli spazi di socialità. Le abitazioni sono affiancate da luoghi che riproducono attività quotidiane: piazze, negozi, caffè, laboratori, che consentono agli ospiti di mantenere abitudini e rituali familiari, rafforzando il senso di appartenenza alla comunità. Un ulteriore aspetto significativo riguarda la progettazione degli spazi aperti e il rapporto con il paesaggio: giardini terapeutici, percorsi circolari e aree verdi accessibili costituiscono elementi centrali nel garantire la libertà di movimento in condizioni di sicurezza, offrendo stimoli sensoriali e opportunità di attività all'aperto.

Sul piano gestionale i casi studio evidenziano modelli organizzativi diversificati, che spaziano dalla gestione pubblica a quella affidata a fondazioni e organizzazioni del privato sociale, spesso nell'ambito di partenariati pubblico-privati. L'analisi comparata consente quindi di identificare configurazioni spaziali, modelli organizzativi e strategie ambientali trasferibili al modello insediativo metaprogettuale. In particolare l'applicazione di tali principi ai piccoli borghi e a contesti residenziali a scala ridotta può costituire un riferimento per proporre nuove infrastrutture di cura in cui abitare, servizi di prossimità e relazioni comunitarie integrate nel supporto alle persone con demenza (De Boer et alii, 2018).

Modello metaprogettuale | L'analisi comparativa delle strutture di cura della demenza ha permesso di individuare configurazioni spaziali e modalità organizzative ricorrenti che, pur nella varietà delle soluzioni architettoniche e gestionali, condividono alcuni principi fondamentali: la trasformazione dell'ambiente di cura in senso più domestico dando vita a spazi capaci di stimolare benessere, comfort e senso di appartenenza (Spadolini and Parodi, 2025), la riconoscibilità degli spazi e la presenza integrata di residenze, servizi sanitari e di socializzazione in relazione con spazi aperti dedicati. Tali elementi costituiscono i criteri con cui si passa dalle ricorrenze dei casi di studio al modello metaprogettuale di infrastruttura di cura diffusa nei borghi, orientato all'accoglienza di persone affette da Alzheimer nelle fasi iniziali della malattia e del personale di assistenza e di cura (Tab. 2).

Il modello interpreta il borgo come un sistema insediativo capace di integrare residenzialità, assistenza e relazioni sociali all'interno del tessuto urbano consolidato, valorizzando la presenza della comunità residente e favorendo forme di interazione e di mutuo beneficio tra i servizi di cura e la vita

locale. A partire dall'analisi dei casi studio e dal confronto con la letteratura scientifica sulle strutture dedicate alla cura della demenza (Del Nord, 2002) sono state individuate alcune aree funzionali omogenee che organizzano il modello: residenzialità, spazi per la socializzazione e attività terapeutiche e riabilitative, servizi sanitari, servizi di supporto e spazi all'aperto per attività ricreative e sensoriali. All'interno di tali ambiti si articolano 'unità ambientali' quali gli alloggi indipendenti o condivisi, gli spazi per attività domestiche, gli ambienti per terapie occupazionali, gli spazi di incontro e servizi di prossimità. Su questa base è stato elaborato un programma edilizio (Tab. 3) che definisce unità ambientali, attività previste e superfici indicative desunte dall'analisi dei requisiti minimi dimensionali previsti dalle normative regionali per le strutture destinate a persone con malattia di Alzheimer, traducendo il quadro esigenziale degli utenti in indicazioni operative per il riuso del Patrimonio edilizio esistente. Il programma rappresenta pertanto uno strumento di orientamento per l'organizzazione spaziale della struttura diffusa e per il dimensionamento degli organismi edilizi che la compongono. Parallelamente il modello metaprogettuale integra i requisiti prestazionali e le relative soluzioni progettuali (Tab. 4); in particolare prende in esame alcune classi esigenziali (sicurezza, benessere, fruibilità, qualità percettiva e gestione) individuate dalla normativa tecnica UNI 8289 (UNI, 1981), declinate in requisiti specifici per ambienti destinati a persone con decadimento cognitivo.

Tra questi assumono particolare rilievo i requisiti di sicurezza d'utenza legati alla prevenzione di cadute, urti o disorientamento e quelli relativi al benessere ambientale (controllo delle condizioni termo-igrometriche, acustiche e luminose). A tali requisiti si affiancano quelli connessi alla fruibilità e all'accessibilità, che prevedono l'eliminazione di barriere architettoniche, sensoriali e cognitive, la possibilità di personalizzare gli ambienti e l'uso di sistemi di segnaletica facilmente interpretabili.

Attenzione è inoltre rivolta alla qualità percettiva e alla comunicatività degli spazi; gli studi di Roger Ulrich (1984) e di Spadolini e Parodi (2025) sulla connessione tra ambienti costruiti e benessere psicofisico dimostrano come fattori quali luce, colore, matericità e configurazione spaziale possano influenzare positivamente la qualità della vita. I requisiti vengono tradotti in soluzioni progettuali che comprendono l'impiego di tecnologie AAL (Ambient Assisted Living) per il monitoraggio degli ospiti, strategie di efficientamento energetico e di retrofit, oltre all'adozione di soluzioni di progettazione inclusiva.

Sulla base delle elaborazioni descritte sono stati sviluppati schemi metaprogettuali di organizzazione spaziale (Fig. 6) basati sulle relazioni tra le unità ambientali e i criteri di aggregazione. Tali schemi non definiscono un modello rigido, ma una struttura aperta e adattabile alle specificità morfologiche dei borghi, configurandosi come base conoscitiva in grado di orientare le scelte progettuali.

Applicazione al Borgo di Cicignano | Il Borgo di Cicignano (RI) è stato selezionato come caso pilota per la sperimentazione del modello di residenzialità diffusa dedicato alle persone con Alzheimer, in ragione delle sue caratteristiche planimetriche e della sua coerenza con i tre fattori strutturali individuati come motori della trattazione: l'invecchiamento della popolazione, lo spopolamento dei borghi e l'incremento dell'incidenza delle patologie neurodegenerative. Piccolo insediamento di origine romana con impianto circolare di matrice medievale, Cicignano si estende su una superficie di circa 7.000 mq e comprende 48 edifici, una piazza e un giardino (Fig. 7). Il Patrimonio costruito è prevalentemente residenziale, articolato in 46 unità abitative, delle quali meno di un terzo è stabilmente abitato, una chiesa e un ex edificio scolastico. È ragionevole ipotizzare che una quota della popolazione anziana residente nel borgo e nelle aree limitrofe, spesso trattenuta da un radicato senso di appartenenza al territorio, possa essere oggi o in futuro interessata da problematiche neurodegenerative, costituendo un bacino privilegiato di potenziali fruitori della struttura proposta.

La compatibilità spaziale del borgo è stata verificata attraverso due strumenti analitici complementari definiti nella fase 3 della metodologia: l'Environmental-Behaviour Model e l'Analisi Spaziale Urbana condotta tramite il software Depth MapX. Il primo ha consentito di valutare i criteri prestazionali critici (Critical Performance Criteria), assegnando punteggi che identificano i punti di forza e le criticità degli spazi rispetto ai parametri di sicurezza, alla leggibilità dei percorsi, alla libertà di movimento all'esterno e alla comprensione sensoriale (Fig. 8). Il secondo ha evidenziato la presenza di percorsi connessi e visivamente integrati, un'elevata accessibilità interna e un controllo spaziale favorevole alla sicurezza e all'autonomia degli ospiti. Dal confronto tra i requisiti definiti e l'assetto planimetrico del borgo è emersa una significativa coerenza morfologica e funzionale, che ha costituito la base della sperimentazione progettuale.

Il progetto pilota del Centro Alzheimer diffuso a Cicignano si confronta necessariamente con la complessità del tessuto edilizio preesistente, richiedendo un approccio capace di conciliare la struttura morfologico-insediativa storica del borgo (Fig. 9) con le esigenze funzionali, terapeutiche e di sicurezza proprie di un'utenza fragile: la mediazione tra conservazione e innovazione si configura come principio ordinatore della strategia progettuale.

L'intervento è stato orientato verso i tre obiettivi principali della sostenibilità, dell'inclusione e del benessere degli utenti, declinati in altrettante direttrici progettuali: il riuso e l'adattamento del Patrimonio esistente, finalizzati a contenere il consumo di suolo; il retrofit energetico, orientato al miglioramento delle prestazioni degli edifici storici; l'adeguamento in termini di accessibilità e integrazione di sistemi domotici, al fine di garantire ambienti sicuri, funzionali e inclusivi.

Gli spazi interni sono stati riprogettati secondo i principi dell'Universal Design e dell'Inclusive Design, con il ricorso alla mobilità assistita e a sistemi di sensori, mentre gli spazi esterni sono stati attrezzati con arredi ergonomici, illuminazione diffusa, pavimentazioni livellate e segnaletica aumentativa. Il modello metaprogettuale così definito è stato sottoposto a verifica applicativa (Fig. 10), associando i requisiti di sicurezza, benessere, fruibilità, aspetto e gestione alle relative soluzioni progettuali, confermandone la coerenza operativa e la compatibilità con il tessuto insediativo del borgo.

Cicignano non è concepito come mero contenitore fisico, bensì come sistema sociale e culturale capace di valorizzare la riconoscibilità dei luoghi e il senso di appartenenza, elementi fondamentali per la qualità della vita delle persone con Alzheimer (Fig. 11). L'adozione di soluzioni innovative, quali la domotica e l'uso consapevole di materiali e cromie, consente di bilanciare funzionalità e qualità estetica, nel pieno rispetto dell'identità del borgo.

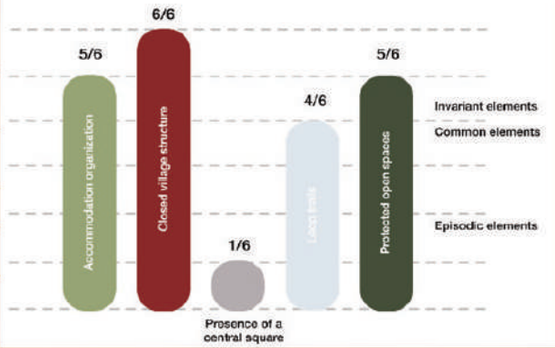
Implicazioni rispetto agli SDG: benefici, sinergie e compromessi | La ricerca contribuisce direttamente al raggiungimento di diversi Obiettivi di Sviluppo Sostenibile (SDG) dell'Agenda 2030 (UN, 2015); in particolare all'SDG 3, in quanto propone un modello insediativo e architettonico diffuso, orientato a sostenere salute, benessere, autonomia e sicurezza delle persone con Alzheimer attraverso ambienti riconoscibili, accessibili e capaci di supportare le pratiche quotidiane di cura. Rispetto all'SDG 10 il modello presentato affronta le disuguaglianze territoriali nell'accesso ai servizi socioassistenziali, promuovendo forme di welfare di prossimità nei contesti marginali. Le implicazioni dirette si rintracciano anche con l'SDG 11, in quanto l'infrastruttura interpreta i borghi come insediamenti inclusivi, sicuri e sostenibili, fondati sul riuso del Patrimonio esistente e sulla prossimità tra abitare, servizi e relazioni sociali, con un'incidenza ancora più marcata sull'SDG 13, grazie alla riduzione del consumo di suolo, al riuso adattivo del patrimonio edilizio e all'integrazione di interventi di retrofit energetico. In termini di sinergie il modello genera cobenefici rispetto all'SDG 1, poiché può ridurre forme di vulnerabilità economica e sociale connesse alla dipendenza assistenziale, all'SDG 5, alleggerendo almeno in parte il carico di cura informale che grava in misura significativa sui caregiver familiari, spesso donne, all'SDG 8, attraverso l'attivazione di servizi di prossimità e di economie locali legate alla cura.

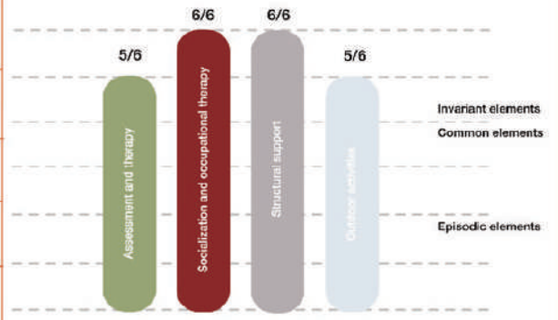
E ancora all'SDG 12, per l'estensione del ciclo di vita del patrimonio costruito mediante riuso e adattamento, agli SDG 16 e 17, in quanto la sua attuazione richiede forme di governance multilivello, cooperazione istituzionale e partenariati tra attori pubblici, privati e del terzo settore, secondo quella logica di convergenza intersettoriale e collaborazione interistituzionale quale condizione necessaria per qualsiasi strategia integrata di rigenerazione urbana orientata al raggiungimento degli SDG (Ricci, Poli and Marino, 2025). Le relazioni con l'SDG 9 sussistono, ma in modo condizionato, limitatamente alla dimensione di innovazione organizzativa, tecnologica e infrastrutturale del modello di cura diffusa, più che alla realizzazione di nuove infrastrutture materiali.

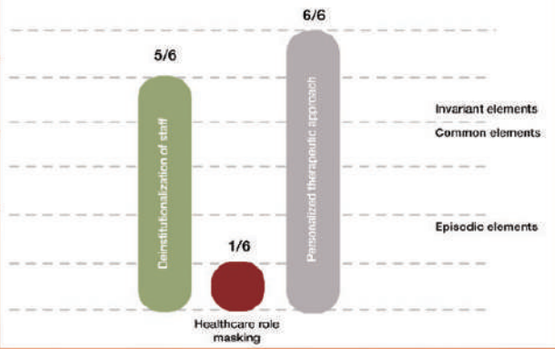
Accanto ai benefici emergono tuttavia alcuni possibili compromessi: l'introduzione di tecnologie assistive, dispositivi di controllo e adeguamenti prestazionali può entrare in tensione con il complesso bilanciamento tra rigenerazione e tutela ambientale; inoltre gli interventi di rifunzionalizzazione possono richiedere un equilibrio delicato tra accessibilità, sicurezza, compatibilità architettonica e sostenibilità economica; infine la stabilità del modello dipende dalla disponibilità di risorse economiche e di personale, competenze gestionali e reti territoriali capaci di sostenerne il funzionamento nel tempo.

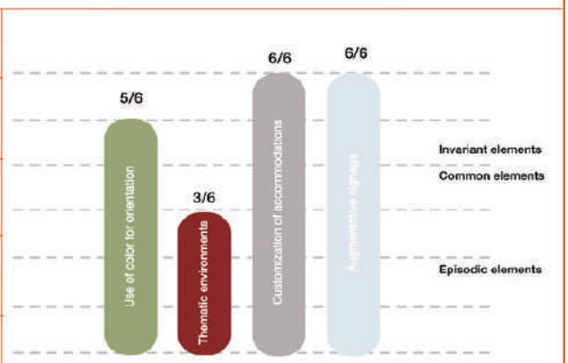
Complessivamente la relazione con gli SDG emerge non come adesione automatica, ma come risultato di una mediazione progettuale tra salute, inclusione, rigenerazione territoriale, adattamento climatico e tutela del Patrimonio, secondo una logica integrata, coerente con l'Agenda 2030.

Requirements	1.	2.	3.	4.	5.	6.	Trasferability	Recurrence rate
Spatial aggregation								
Accommodation arrangements, groups of 6-7 people	X	X		X	X	X	with adjustments	
Closed village structure	X	X	X	X	X	X	with adjustments	
Presence of a central square	X						non transferable	
Loop trails	X		X	X		X	non transferable	
Protected open spaces	X	X		X	X	X	with adjustments	
Critical issues	/	outdoor spaces do not promote orientation	lack of outdoor spaces	lack of a central point of reference	outdoor spaces do not promote orientation	lack of outdoor spaces		
Functional aspects of services								
Assessment and therapy such as internal health services	X		X	X	X	X	with adjustments	
Socialization and occupational therapy	X	X	X	X	X	X	immediate	
Structural support	X	X	X	X	X	X	immediate	
Outdoor activities	X	X		X	X	X	immediate	
Critical issues	/	lack of a frequently updated guest health record	lack of open spaces limits the range of daily activities	/	/			
Care based approach								
Deinstitutionalization of staff		X	X	X	X	X	immediate	
Healthcare role masking	X						immediate	
Personalized therapeutic approach	X	X	X	X	X	X	immediate	
Critical issues	masking the healthcare role can 'parody' the healthcare function	/	/	/	/	/		
Environmental communication								
Use of color for orientation	X	X	X	X		X	immediate	
Use of themes to identify environments	X			X	X		immediate	
Customization of accommodations	X	X	X	X	X	X	immediate	
Augmentative signage	X	X	X	X	X	X	immediate	
Critical issues	/	reduction of effectiveness of the elements that guide orientation	reduction of effectiveness of the elements that guide orientation	/	reduction of effectiveness of the elements that guide orientation	reduction of effectiveness of the elements that guide orientation		









1. Il «Paese Ritrovato» in Monza | 2. Villaggio Emmanuele in Rome | 3. The Casa Paese of Ciciala (CZ) | 4. The Hogeweyk Dementia Village, Weep Netherlands | 5. Village Landais Alzheimer, Dax France | 6. Furuset Hageby Alzheimer Village, Oslo Norwey

Fig. 5 | Recurring design characteristics in the case studies: comparative analysis and percentage incidence (credit: the research group, 2026).

Recurring design elements	Scale	Therapeutic function	Organisational function	Implicit spatial requirement	Compatibility with the borgo	Transferability	Conditions for adaptation
1. Housing units for 6–8 guests	building	support for independence and social control	useful at a management level for assistance and cleaning activities	residential area that can be divided into independent units; units ≤300 square meters with central common area; direct access or proximity to secure outdoor space	high	immediate	compatible with nearby accommodation availability
2. Completely enclosed borgo	urban	free and safe wandering	advantages for safe management	controlled access; visual barrier between interior and exterior; security zone	low	with adjustments	compatible with the layout of the borgos; can be implemented by closing off passages and erecting fences
3. Central square	urban	wayfinding and perceptual orientation	advantages for safe management	geometrically legible open or semi-open space; mutual visibility between buildings and centre; absence of dominant visual barriers; converging paths	medium	with adjustments	compatible with the borgos structure; integrates central open spaces and converging pathways
4. Circular paths	urban	free and safe wandering	advantages for safe management	clear hierarchy between main and secondary paths	high	immediate	compatible with the borgos structure; continuous paths without junctions
5. Protected open / green spaces	urban / management	free and safe wandering	advantages for safe management	controlled access; security zone; controlled mutual visibility	medium-low	with adjustments	requires dimensional adaptation and controlled perimeter; mutual visibility guaranteed
6. Internal healthcare services	management	dynamic diagnosis for targeted therapies	advantages for residents' health management	maximum distance between residence and service ≤ 100–150 m	/	with adjustments	requires maximum proximity to residences; integration with main paths
7. Services for socialisation and occupational therapy	management	stimulation, enhancement, and maintenance of residual abilities	/	maximum distance between residence and service ≤ 100–150 m	/	with adjustments	requires proximity to housing units and easy access to the pathways
8. Facility support services	management	/	advantages for borgo management	/	/	with adjustments	/
9. Deinstitutionalisation of care	management	reduction of stigma, normalisation of daily life	optimisation of assistance services	scalar domestic spaces; non-dominant operator stations; integration with non-healthcare functions	/	/	integration between guests and operators guaranteed by the fluid structure of the borgos
10. Personalised therapeutic approach	management	targeted and efficient therapies	optimisation of assistance services	variety of integrated services offered that are compatible with the context	/	/	/
11. Environmental characterisation through the use of colour	building	support for episodic memory, perceptual orientation	optimisation of independence and livability of environments	legible and unambiguous materiality; presence of visual landmarks	high	immediate	intrinsic characteristics of borgos to be enhanced
12. Environmental characterisation through the use of themes	building	support for episodic memory, perceptual orientation, wayfinding	optimisation of independence and livability of environments	legible and unambiguous materiality; presence of visual landmarks	high	immediate	intrinsic characteristics of borgos to be enhanced
13. Personalised accommodation	building	familiarity with the environment	optimisation of independence and livability of environments	customisable domestic spaces	/	immediate	/
14. Augmentative signage	urban	wayfinding, perceptual orientation, visual and symbolic support	optimisation of independence and livability of environments	visible positioning; consistency and repetitiveness; integration with architecture	/	immediate	/
15. Very large facility	urban	dispersion, sense of disorientation	management economy	/	low	not transferable	incompatible with the scale of the borgos

Tab. 2 | Transferability matrix of recurring design elements from case studies to the meta-project model of distributed infrastructure within 'borghi': scale of intervention, therapeutic and organisational function, implicit spatial requirements, contextual compatibility and adaptation conditions (credit: the research group, 2026).

Functional area	Environmental unit	Code	Activity	Minimum area
A.F.1.a – Residence Type of independent apartments	living	U.A.1	domestic tasks, recreational activities, manual skills, socialisation, relaxation	12 m²
	dining	U.A.2	domestic tasks, socialisation	12 m²
	kitchen	U.A.3	meal preparation, domestic tasks, manual skills	3 m² kitchenette to be added to the living area; if the room is habitable, 9 m²
	bedroom	U.A.4	overnight stay and daily rest	18 m²
	bathroom	U.A.5	personal hygiene	size suitable for accommodating the minimum required sanitary equipment; bathroom facilities with a minimum side length of no less than 1.20 m
	study	U.A.6	hobbies and personal activities	12 m²
A.F.1.b – Residence Shared accommodation type	living room	U.A.1	domestic tasks, recreational activities, manual skills, socialisation, relaxation	2.5–3 m² per user
	dining room	U.A.2	domestic tasks and socialisation	2.5–3 m² per user
	kitchen	U.A.3	meal preparation, domestic tasks, manual skills	3 m² kitchenette to be added to the living area; if the room is habitable, 9 m²
	bedroom	U.A.4	overnight stay and daily rest	18 m²
	bathroom	U.A.5	personal hygiene	size suitable for accommodating the minimum required sanitary equipment; bathroom facilities with a minimum side length of no less than 1.20 m
	staff bedroom	U.A.8	overnight stay and daily rest	9 m²
	staff bathroom	U.A.9	personal hygiene	size suitable for accommodating the minimum required sanitary equipment; bathroom facilities with a minimum side length of no less than 1.20 m
A.F.2 – Support, management, and adminitrative services	entrance with concierge	U.A.10	supervised entry and exit	9 m²
	administrative office	U.A.11	administration and management	9 m²
	interview area	U.A.12	meetings between therapist / social worker and family members	9 m²
	warehouse	U.A.13	storage	4 m²
	cleaning equipment storage	U.A.14	storage of cleaning equipment	4 m²
	laundry room	U.A.15	space dedicated to washing, drying, and caring for textiles	1.5-2 m²
	tool shed	U.A.16	storage of gardening and outdoor maintenance equipment	4 m²
A.F.3 – Services for evaluation and therapy	infirmary	U.A.17	checking guests' health, administering basic medical care and over-the-counter medicines, assessing the progression of the disease	9 m²
	individual therapy room	U.A.18	assessing individual residents' abilities, planning individual and group activities	9 m²
	gym	U.A.19	movement and self-awareness, physiotherapy sessions	in the case of group activities (groups of no more than 5 people), the gym must be no smaller than 35 m²; for each guest beyond the first 5, the surface area must be increased by at least 5 m²
A.F.4 – Services for socialisation and therapeutic work	multipurpose area	U.A.20	manual activities that suit the nature and preferences of guests	3-5 m²
	worship area	U.A.21	prayer	/
	beauty treatment area	U.A.22	periodic beauty and personal care activities	20 m²
	mini-market	U.A.23	sale of basic foodstuffs, re-education in money management, therapeutic activities	between 40 m² and 50 m² (for the definition of mini-market)
	bar	U.A.24	work activities	17 m² (9 m² of commercial space, 4 m² of restrooms, 4 m² of storage space)
A.F.5 – Outdoor services	garden	U.A.25	movement and self-awareness, recreational activities, manual skills, relaxation	/
	therapeutic activities vegetable garden	U.A.26	movement and self-awareness, recreational activities, manual skills, relaxation	/

Tab. 3 | Building programme: identification of functional areas and environmental units of the model, with dimensional indications compared to the relevant regulatory framework (credit: the research group, 2026).

Conclusioni | La ricerca ha esplorato la possibilità di interpretare i borghi in via di spopolamento come infrastrutture territoriali di cura, in grado di integrare l'abitare, l'assistenza e le relazioni di prossimità in risposta ai bisogni emergenti legati all'invecchiamento della popolazione e alla diffusione delle patologie neurodegenerative. L'analisi comparata di modelli residenziali innovativi per la demenza e la definizione di un modello metaprogettuale hanno consentito di individuare criteri spaziali, organizzativi e prestazionali potenzialmente trasferibili ai contesti insediativi di scala ridotta. L'applicazione al Borgo di Cicignano ha evidenziato una significativa compatibilità tra i requisiti ambientali, tecnologici e gestionali delle strutture dedicate alla cura dell'Alzheimer nelle fasi iniziali e le caratteristiche morfologiche e relazionali dei piccoli insediamenti storici, suggerendo la possibilità di sviluppare forme di cura diffuse integrate nel tessuto urbano esistente.

La ricerca dimostra la possibilità di costruire modelli di residenzialità per la demenza non necessariamente ex novo, ma derivati dall'adattamento di sistemi insediativi esistenti, a condizione che siano soddisfatti specifici requisiti di compatibilità spaziale, organizzativa e prestazionale. La trasferibilità del modello è tuttavia subordinata a un insieme di condizioni abilitanti e di fattori critici. Tra questi assumono particolare rilievo i vincoli normativi in materia di sicurezza e accessibilità, che, sebbene necessari, possono limitare le possibilità di intervento sui manufatti edilizi storici, richiedendo soluzioni progettuali specifiche e non standardizzate; la sostenibilità economico-gestionale nel medio-lungo periodo, legata sia ai costi di adeguamento e gestione sia alla capacità di attivare modelli organizzativi e finanziari stabili; la disponibilità di personale qualificato per la gestione dei servizi di cura, elemento determinante soprattutto nei contesti marginali caratterizzati da carenza di risorse professionali.

A questi si affiancano fattori di natura socio-territoriale, quali il consenso e il coinvolgimento delle comunità locali, fondamentali per garantire l'accettabilità e l'integrazione delle funzioni di cura nel tessuto esistente e la presenza di una dotazione sanitaria di prossimità adeguata, necessaria a supportare le funzioni assistenziali e a garantire la continuità dei servizi. Ulteriori criticità riguardano la frammentazione proprietaria del Patrimonio edilizio, che può ostacolare processi coordinati di riuso e trasformazione, nonché la necessità di mediare tra esigenze di tutela e interventi di adattamento funzionale. Questi fattori delineano un quadro di fattibilità non uniforme, che richiede approcci adattivi, strumenti di governance integrata e strategie differenziate in relazione alle specificità dei contesti.

In termini di implicazioni la ricerca suggerisce un rafforzamento dell'approccio tecnologico al progetto di architettura inteso come dispositivo di integrazione tra spazio, servizi e comunità, contribuendo a ridefinire il ruolo dei borghi all'interno delle politiche di welfare territoriale. Sul piano delle policy emerge la necessità di strumenti normativi e programmatici in grado di supportare interventi di riuso adattivo orientati alla cura, favorendo modelli organizzativi flessibili e integrati. In relazione ai sistemi di welfare il modello proposto si colloca nell'ambito di una transizione verso forme di assistenza di prossimità (Pollo, Biolchini and Scognamiglio, 2023), che richiedono un coordinamento tra scala locale e reti territoriali più ampie, promossa dal PNRR[1] e dal DM 77/2022 (Ministero della Salute, 2022). La natura esplorativa della sperimentazione, basata sull'applicazione del modello a un primo caso pilota, rappresenta un limite dello studio; sebbene consenta di verificare la coerenza tra i requisiti individuati e le caratteristiche morfologiche del contesto analizzato, la trasferibilità del modello richiederà ulteriori sperimentazioni in borghi con condizioni insediative, demografiche e infrastrutturali diverse. Sono infatti in corso ulteriori applicazioni in contesti territoriali del Lazio, finalizzate a validare e affinare il modello e a verificarne l'adattabilità rispetto alla disponibilità di Patrimonio edilizio, alla dotazione di servizi sanitari e alla struttura sociodemografica delle comunità locali.

In continuità con i primi risultati futuri sviluppi potranno orientarsi verso processi di progettazione partecipata, con il coinvolgimento di stakeholder sanitari, Amministrazioni locali, operatori socioassistenziali e residenti, per meglio valutare la sostenibilità sociale, organizzativa ed economica delle soluzioni proposte. In questa direzione è in fase di sviluppo una mappatura strutturata degli stakeholder pubblici e privati coinvolti, finalizzata a evidenziare il ruolo e il contributo dei diversi attori nelle varie fasi di pianificazione, progettazione e gestione degli interventi di rigenerazione, mediante strumenti di analisi degli attori coinvolti (Bottero and Datola, 2020). Tali risultati potranno contribuire a rafforzare l'impatto sociale degli interventi e a integrare i servizi di cura nelle reti comunitarie esistenti.

Alla luce delle riflessioni maturate e dei risultati conseguiti i borghi possono essere reinterpretati come nodi di un sistema di cura territoriale diffusa, capaci di connettere rigenerazione urbana, innovazione di modelli assistenziali e sviluppo di nuove infrastrutture sociali per comunità fragili, contribuendo a ridefinire il ruolo delle aree interne non più come ambiti marginali, ma come contesti attivi di sperimentazione progettuale e sociale. Viene evidenziato che la relazione tra salute e ambiente costruito non può essere ridotta a una dimensione prestazionale, ma richiede un'integrazione tra configurazione spaziale, organizzazione dei servizi e pratiche d'uso. Infine il riuso adattivo del Patrimonio emerge non solo come strategia di conservazione, ma come dispositivo operativo per la costruzione di nuovi modelli di welfare territoriale, evidenziandone al contempo le potenzialità e le criticità di attuazione.

The progressive depopulation of 'borghi', understood as small historic settlements, and inland areas represents a significant critical issue within the Italian and European context. These territories are affected by processes of demographic, economic, and infrastructural marginalisation, which translate into a gradual reduction of essential services, the abandonment of built heritage, and the weakening of local social networks (Barbera, Cersonimo and De Rossi, 2022; Baró Zarzo, Poyatos Sebastián and Martínez Martínez, 2020).

In Italy, the phenomenon takes on an endemic relevance, affecting extensive portions of the territory and profoundly influencing demographic and socio-economic balances: inland areas cover approximately 60% of the national territory, yet host less than a quarter of the resident population, are configured as territories characterised by structural fragilities but also by potential resources for sustainable territorial regeneration strategies (Brignoni et alii, 2023), the implementation of which requires the integration of competences, tools and multidisciplinary approaches (Carrosio, 2019).

This direction has also been reaffirmed in the 2021-2027 Guidelines of the National Strategy for Inland Areas (PSNAI), which recognises marginal territories not only as areas of intervention to counter demographic decline, but also as territorial assets and privileged contexts for experimenting with local development policies (Presidenza del Consiglio dei Ministri – Dipartimento per le politiche di coesione e per il Sud, 2021), through a context-centred approach based on the construction of integrated territorial projects.

However, the progressive thinning out of essential services and the increasing distance from healthcare infrastructures exacerbate territorial inequalities, with direct effects on the quality of life of communities and on equitable access to health services (Piazzoni and Terraneo, 2025). Territorial disparities can be interpreted both in their spatial dimension, linked to the distribution of services and the configuration of settlement patterns, and in their social dimension, relating to the capacity of territories to sustain relational networks and forms of community support (Fiorini et alii, 2025).

Alongside the fragilities affecting 'borghi' and inland areas, there are also demographic vulnerabilities linked to population ageing and the growing incidence of neurodegenerative diseases among the elderly, including various forms of dementia and, in particular, Alzheimer's disease. The spread of these conditions has reached significant proportions, emerging as one of the main social and healthcare challenges of contemporary societies. According to the World Health Organisation (WHO, 2021), more than 55 million people worldwide live with a form of dementia, and this number is estimated to reach 139 million by 2050. Alzheimer's disease represents the most widespread form, accounting for approximately 70% of dementia cases, with implications not only for healthcare systems but also for the organisation of living environments and care models (Long, Benoist and Weidner, 2023). In Italy, according to the Dementia Observatory of the Istituto Superiore di Sanità (2024), approximately 1,200,000 people are affected by dementia, of whom around 600,000 have a diagnosis of Alzheimer's disease. The impact of the condition extends beyond those directly affected to a wide network of family members and caregivers, estimated at around 4 million, who provide daily assistance. This situation highlights the increasing pressure on welfare systems and the inadequacy of institutionalised care models, thus requiring new territorial and community-based solutions for care environments.

Numerous studies have shown how traditional care models are often inadequate in responding to the needs of people with dementia, particularly in the early stages of the disease, when maintaining autonomy and social relationships is a determining factor for quality of life and health conditions (Amodio, 2021; Marquardt and Schmieg, 2009; Marquardt, Bueter and Motzek, 2014). This growing awareness has directed research towards the role of the built environment in supporting care processes and in fostering the maintenance of residual capacities in people with dementia. In recent decades, the scientific debate has increasingly re-

Needs class	Requirement classes	Requirements	Design macro-category	Design solution
1. Safety	fire safety	checking escape routes, fire resistance of materials and technical elements	/	establishment of a simplified evacuation plan with a single safe destination; safety signage created using the method of augmentative and alternative communication; materials and finishes with fire reaction class A1 or A2
	user safety	checking the size, shape, and positioning of furniture and equipment in terms of preventing falls and collisions, technological monitoring systems for guest safety	accessibility and smart technologies	bed pressure detector; methane gas detector; pull cord emergency button; 'overflow' flood sensor; uniform, level flooring; use of colour contrast and luminance principles between surfaces and components
2. Well-being	thermal and hygrometric	checking air humidity and temperature levels	energy retrofitting; smart technologies	Aerogel interior insulation; thermally insulating plaster on the façade; low-emissivity glass on the north-facing sides; windows with controlled mechanical ventilation (CMV); remote-controlled temperature sensor
	acoustic	sound insulation, control of noise produced	energy retrofitting; smart technologies	Aerogel internal insulation layer; removal of radio / TV equipment in common areas
	visual and perceptual	control of light intensity, control of glare and shadow areas, control of colour, visual control	accessibility and smart technologies	tubular daylighting systems; use of colour contrast and luminance on surfaces and components; diffuse lighting positioned to avoid creating shadows; step lights/bedside lights; lighting control via motion sensors; light intensity control switch
	olfactory	control of unpleasant odours	/	/
	tactile	control of roughness	/	/
3. Usability	accessibility	absence of architectural and sensory barriers	accessibility	ensure adequate functional mobility within interior spaces, including for people requiring assistance or mobility aids; provision for the installation of stairlifts with seats at internal / external stairways; seating with armrests
	adaptability of spaces	personalisation, provision of personalised signage	accessibility and smart technologies	use of signage systems, inside and outside buildings, that employ the principles of Augmentative and Alternative Communication
4. Appearance	of spaces	easily recognisable, customisable, and comfortable spaces, in order to promote a sense of belonging and well-being among users	accessibility	use of signage systems, inside and outside buildings, that use the principles of Augmentative and Alternative Communication; guests can furnish their residences with their own furniture
	of technical elements	design consistent with the overall aesthetics of the space and non-invasive or visually unpleasant	accessibility	masking elements (e.g., placing pots and plants in front of doors, removing door frames and painting them the same colour as the wall, using adhesive prints to mask technical compartments, etc.)
5. Management	economic	/	/	/
	maintainability	/	/	/
	operation	/	smart technologies	remotely accessible local control system
	flexibility	adaptability of spaces and integrability of furnishings and equipment	accessibility	in common areas, preference is given to movable furniture without sharp edges that can be moved around the space depending on the activities being carried out

Tab. 4 | Correlation between user requirements, performance requirements and related design solutions (credit: the research group, 2026).

cognised the role of the built environment as a determinant of human health and well-being (Rao et alii, 2007; Fazeli Dehkordi, Khatami and Ranjbar, 2022): the physical environment can influence behaviours, perceptions and emotional states, contributing to the prevention of chronic diseases and the improvement of quality of life (Setola and Borgianni, 2025). In particular, in the field of care environment design, architecture is increasingly called upon to integrate healthcare, psychological, and social dimensions into solutions that promote health and well-being within communities.

On these premises, the theoretical framework underpinning this research is based on Evidence-Based Design (EBD), Neuro-Environmental Design and the Environment-Behaviour (E-B) model, which interpret built space as a device capable of supporting therapeutic processes and influencing behavioural dynamics (Ulrich et alii, 2010; Attaianese, Barilà and Perillo, 2025; Zeisel, Hyde, and Levkoff, 1994). In the specific case of people with dementia, these approaches demonstrate how recognisable spatial configurations, domestic-like environments, and easily legible pathways can improve orientation, reduce stress and support users' residual abilities (Day, Carreon and Stump, 2000; Fleming et alii, 2017).

On this theoretical basis, innovative small-scale care models have been developed in recent years, including so-called dementia villages and small-scale living models, which reproduce familiar urban environments within protected settings like real-life contexts (Verbeek et alii, 2009; Krier et alii, 2023). These models have demonstrated that the quality of the built environment can significantly contribute to residents' well-being, promoting autonomy, social relationships, and continuity of daily practices, and that this effect can be achieved through more flexible, accessible, and inclusive spatial configurations (Battaino, Fossati and Marconi, 2025).

Within the dynamics described above, a convergence emerges between territorial regeneration policies and innovative proximity-based welfare models. Depopulated 'borghi', characterised by a contained urban scale, spatial recognisability and a consolidated relational dimension, can represent settlement contexts particularly compatible with the needs of people with neurocognitive dis-

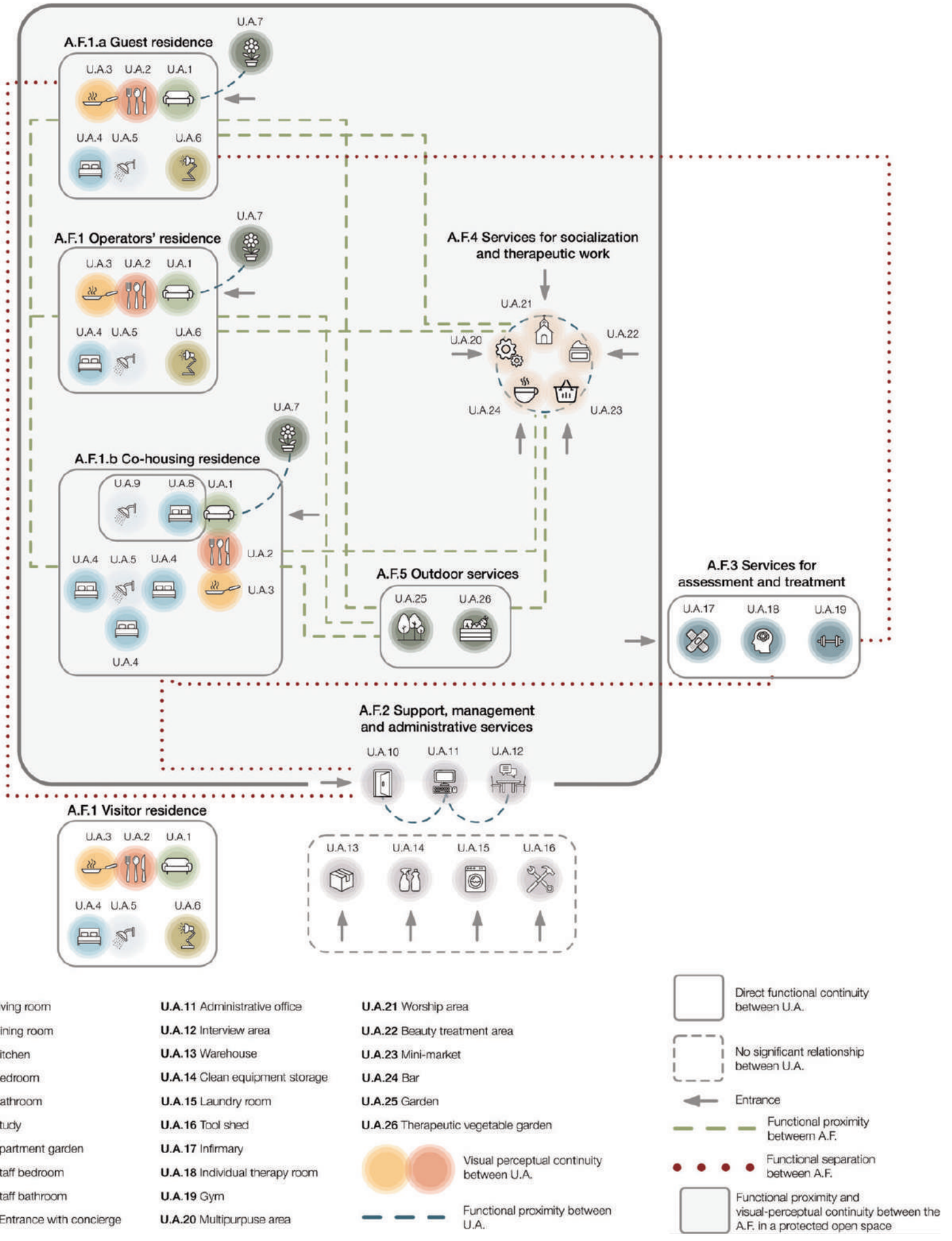


Fig. 6 | Organisational-functional layout: discretisation of optimal relationships between functional areas and environmental units (credit: A. Mezzalana, 2026).

orders. The compact structure of historic settlements, the presence of protected public spaces, and the proximity between dwellings and services promote orientation, safety, and social interaction, thereby constituting fundamental elements in the design of environments responsive to the needs of people with dementia.

The convergence between the fragility of individuals and that of territories can thus be transformed into a design opportunity, developing innovative residential models capable, on the one hand, of improving the quality of life of people with Alzheimer's in the early stages of the disease, and on the other, of activating processes of socio-territorial regeneration in contexts that are currently marginalised.

On these premises, the present contribution aims to interpret 'borghi' as infrastructures of distributed care, that is, settlement systems capable of integrating living, assistance, and proximity-based relationships within the existing urban fabric (Ricci, Battisti and Monardo, 2014). This approach goes beyond the model of dedicated healthcare facilities organised as simulated villages, proposing instead a territorial care model based on the reuse and adaptation of built heritage and the activation of local social and spatial resources. Starting from the scientific debate on the regeneration of 'borghi' and on innovative settlement solutions for dementia, the objective of this study is to verify the transferability of design experiences comparable to dementia villages and small-scale living models to the context of 'borghi', identifying recurring spatial, organisational, and performance characteristics useful for defining meta-project guidelines for a distributed socio-care structure.

In line with this objective, the research is structured around the following questions: a) To what extent are dementia care models based on dementia villages and small-scale living transferable to the context of 'borghi' and inland areas? b) Which spatial, organisational, and performance characteristics of the analysed models and which meta-project strategies for adapting built heritage are decisive in configuring, within historic contexts, environments that are favourable for people with Alzheimer's in the early stages of the disease? c) In what way can the settlement fabric of 'borghi' be reinterpreted as a distributed care infrastructure, contributing both to the well-being of people with dementia and to processes of socio-territorial regeneration? These questions are addressed through an applied verification, in which the validity of the proposed framework is tested in Borgo di Cicignano (RI) to assess its coherence and adaptability to a historic settlement fabric. Through a comparative analysis of national and international case studies of facilities for people with Alzheimer's and the definition of a meta-project model, the research aims to demonstrate how distributed architecture can act as a spatial and social device capable of mediating between care, heritage protection, and territorial regeneration.

Starting from the theoretical and methodological framework outlined above, the paper is structured into four parts, which lead from the definition of investigative tools to the applied verification of the proposed model. The first part is devoted to the methodology and analytical protocol adopted, understood as a structured set of procedures for case selection, qualitative indicators, interpretative tools, and decision-making criteria, aimed at ensuring the transparency and replicability of the research process. The second part develops a comparative analysis of national and international case studies on dementia villages and small-scale living models, to identify spatial, technological, and organisational patterns.

Based on this evidence, the third part defines a metaproject model of distributed care infrastructure, structured into aggregation criteria, performance requirements and guidelines for adapting existing built heritage. The fourth part includes the verification of the model's transferability through its application to Borgo di Cicignano (RI, Italy), analysed at different scales (urban and building scales), followed, in the conclusions, by a discussion of the results, including the potential and limitations of the proposed approach in relation to territorial regeneration processes and proximity-based welfare models. Considering this structure, the present study does not merely analyse and systematise Alzheimer village models, but proposes a shift in scale, settlement basis, and paradigm, moving from newly built protected facilities to the adaptive reuse of 'borghi' heritage as a socio-territorial care infrastructure.

Methodology | The research adopts an analytical-comparative approach based on case studies, aimed at constructing a meta-design model for health and social care facilities intended for people affected by Alzheimer's disease in the early stages of the condition, to be transferred to 'borghi'. The theoretical framework integrates contributions from the Environmental-Behaviour Model, Evidence-Based Design and Neuro-Environmental Design, which interpret the built environment as a support for orientation, the containment of wandering behaviours, and the promotion of autonomy and safety. The methodology also combines multiscalar spatial analyses to develop transferable design criteria, which are verified through application to a pilot case (Fig. 1).

The first phase involves the comparative analysis of national and international facilities attributable to dementia village models or to small-scale living configurations. Case studies are selected based on specific criteria: target users comprising people with Alzheimer's disease in the mild or moderate stages; spatial organisation based on recognisable settlement configurations similar to those of everyday life; the presence of integrated healthcare, rehabilitation, and socialisation services; and the availability of design and management documentation. The comparative analysis enables the identification of spatial layouts, organisational models, and environmental, and technological solutions useful for defining a model of distributed care infrastructure in 'borghi'.

The second phase involves an urban-scale analysis to verify the morphological compatibility of the borgo with the environmental requirements for people with dementia. The analysis integrates criteria derived from the Environmental-Behaviour Model (Zeisel, Hyde, and Levkoff, 1994), including orientation, spatial legibility, control of exits, and management of wandering behaviours, with configurational analysis tools derived from the Space Syntax methodology (Hillier, 2007), which interprets space through graphs and metrics of visual integration, connectivity and intelligibility.

The third phase is devoted to analysis at the building scale. Environmental requirements are translated into design criteria relating to accessibility and the supportive-prosthetic capacity of spaces, according to the principles of Universal Design (Preiser and Ostroff, 2001) and Inclusive Design (Coleman, 1994), and to the integration of smart technologies supporting people with dementia (Chen et alii, 2025). From this perspective, the propensity of a space to support movement, particularly for more vulnerable users, depends not only on usability and the configurational-dimensional relationship (accessible space), but also on the capacity of the space to function as an experiential environment (psychophysical-metabolic relationship) and as a 'prosthetic' environment, capable of stimulating activities that are fundamental for health (Chaza, Revelli and Cellucci, 2024). The analysis also considers strategies for the reuse and retrofit of existing built heritage, as well as energy-efficiency interventions, to ensure environmental sustainability and reduced land consumption.

The fourth phase brings together the results of the previous analyses to define a meta-project model of distributed socio-care facilities, structured into criteria for residential aggregation, minimum service provision and environmental and technological requirements. The model is translated into a building programme, an organisational-functional layout, and the identification of performance requirements and related solutions.

The fifth and final phase consists of applying the meta-project model to the Borgo di Cicignano (RI), selected as a pilot case for testing the compatibility between the environmental requirements of Alzheimer care facilities and the morphological characteristics of 'borghi'. This application makes it possible to outline initial reflections on the evaluation of the model's transferability.

Analytical framework and operational tools | This section summarises, for each methodology phase, the datasets, selection criteria, qualitative variables, analytical tools, indicators, and decision rules. For the first phase, in line with established approaches in the international literature on environments for dementia (Gan et alii, 2022; Ghamari et alii, 2025) and in comparative case study-based research, the case study selection protocol was structured in four steps.

Firstly, inclusion criteria were defined, aimed at identifying settlement models consistent with the research objective, including: a) target users consisting of people with Alzheimer's disease in the early or moderate stages of the condition; b) spatial configuration attributable to dementia village or small-scale living models, with organisation into small-scale residential units integrated within a unified settlement system; c) presence of integrated healthcare, rehabilitation and socialisation services; d) adoption of an approach oriented towards reproducing conditions of everyday life; e) availability of design, management, or scientific documentation adequate to support comparative analysis. At the same time, more stringent exclusion criteria were defined to ensure sample homogeneity and comparability. The following were excluded: a) models attributable to traditional residential care homes or hospital-based facilities characterised by a predominantly clinical organisation; b) interventions lacking a clear settlement config-



Fig. 7 | Borgo di Cicignano: the circular layout configures open space as a protected environment, fostering freedom of movement, legibility of pathways and conditions of autonomy and safety for residents. In the territorial context, the quality of the landscape contributes to the sensory perception of external stimuli, with positive effects on residents' health and well-being (source: cicignano.com, 2020).

Next page

Fig. 8 | Comparison between the Critical Performance Criteria of the Environmental-Behaviour Model and their compliance within the settlement fabric of Borgo di Cicignano (credit: the research group, 2026).

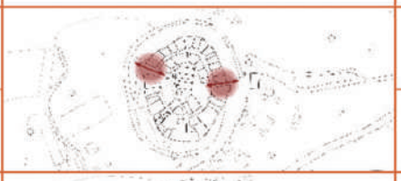
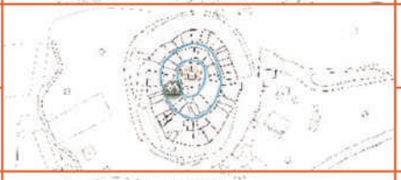
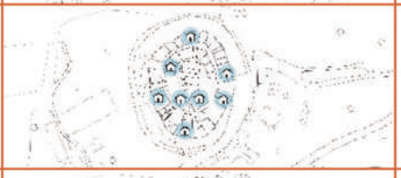
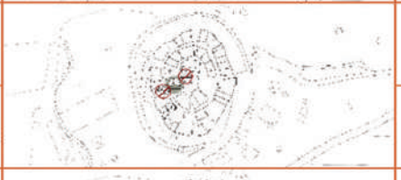
uration or not referable to village-type or small-scale logics; c) facilities intended for advanced stages of the disease with high care intensity, not compatible with the objective of maintaining autonomy; d) experimental cases not realised or not operational; e) examples for which sufficient, verifiable, or comparable documentation was not available (absence of spatial, functional, or management data). The selection was then carried out through a systematic review of scientific literature, and documentary sources between January and September 2025, including international academic databases (Google Scholar, Scopus, and Web of Science), as well as institutional reports, technical publications, and design documentation. Priority was given to cases frequently cited in the disciplinary debate and recognised as best practices at both national and international levels. The selection was further refined according to settlement relevance, distinguishing between national cases (selected for their dimensional, organisational and managerial compatibility with the model of distributed care infrastructure in 'borghi') and international cases, considered emblematic references for spatial, environmental and care innovation.

Once the sample was defined, the case studies were organised into an analytical dataset, structured according to a comparative grid including: context and size of the facility, number of residents and corresponding stage of the disease, morphological and settlement characteristics, spatial aggregation, environmental legibility and orientation strategies, management model, care approach and funding. This structure enabled comparisons across contexts and the identification of recurring patterns, variations, and conditions of transferability. In the second phase, the reference datasets derived from the Environmental-Behaviour Model (Zeisel, Hyde, and Levkoff, 1994) were reworked and transferred to the urban scale, translating the Critical Performance Criteria into observable variables and spatial indicators, useful for verifying the morphological compatibility of the borgo with environmental requirements capable of supporting orientation, autonomy and well-being of people with dementia, structured as follows:
– Exit control (immediacy of control; invisibility of exits), to evaluate the ability of the environment to ensure safety through discreet and non-stressful control devices, while avoiding visual stimuli that may induce escape behaviours;
– Wandering pathways (continuity; wayfinding), to identify the presence of continuous, legible and uninterrupted circulation systems that favour spontaneous movement and orientation;
– Patient room (privacy; personalisation), to verify the possibility of providing recognisable and adaptable individual spaces capable of supporting identity and sense of belonging;
– Common spaces (quantity; variability), to assess the availability and diversification of collective environments that support different levels of social interaction and activities;
– Outdoor freedom (availability; support), to identify elements of accessibility to safe and equipped open spaces, allowing the experience of the outdoors under controlled conditions;
– Residential dimension (scale; familiarity), in terms of spatial configuration at a domestic scale, recognisable and capable of evoking everyday living environments;
– Support for autonomy (safety; supportive spatial capacity), to evaluate environmental solutions that compensate for cognitive difficulties, reducing risks and facilitating the use of space;
– Sensory comprehension (stimuli management; comprehensibility), in terms of control and quality of perceptual stimuli (visual, acoustic, tactile) to ensure legible and non-disorienting environments.

A qualitative evaluation structure was associated with these requirements of compliance and resulting morphological compatibility, aimed at verifying the degree of correspondence between the spatial characteristics of the borgo and the set of considered requirements (Tab. 1).
At the urban scale, morphological compatibility was further investigated through operational parameters derived from configurational analyses, with reference to spatial indicators calculated using the DepthmapX software. These parameters, including visibility analysis, step depth and isovists, were used as interpretative support for discussing the morphological, visual and relational properties of the urban system, structured as follows:
– Visibility analysis (visual breadth; perceptual intensity), through the measurement of the amount of space visible from each point in the environment, distinguishing between areas with wide visibility and areas with limited visibility in relation to the presence and distance of surrounding built elements; compliance is considered high in conditions of reduced visibility;
– Step depth analysis (accessibility; connectivity), through the representation of the number of connections or steps required to reach a node from another within the spatial system; high step depth, with a large number of turns required to reach a node, indicates conditions of low accessibility and difficulty of reachability, whereas low step depth, with a limited number of turns, indicates proximity and ease of movement between nodes; compliance is considered high in the presence of low step depth;
– Isovist analysis (spatial perception; contextual legibility), through the representation of the visible area from a specific observation point within the urban fabric; isovists make it possible to assess how spatial configuration influences perception and use of space, highlighting favourable or critical conditions for orientation and safe movement.

The evaluation systems were structured on a dichotomous ordinal scale (high-low compliance), with levels defined by qualitative descriptors, to ensure interpretative coherence, traceability of judgement, and replicability of the analysis. Specifically, 'high' compliance indicates morphological configurations consistent with the considered criteria. In contrast, 'low' compliance indicates weak compatibility or a lack of coherence, enabling a comparative reading of the contexts under evaluation.

The third phase is dedicated to building-scale analysis. The requirements were translated into a dataset structured into thematic categories (accessibility, supportive spatial capacity, technological integration, sustainability), each associated with observable variables and qualitative evaluation criteria relating to spatial configuration and building performance. Verification was carried out through qualitative descriptors and compliance conditions, aimed at assessing the degree of coherence between the building configuration and the requirements framework, supporting a comparative reading of the analysed housing units. The analysis also integrates variables relating to the

Critical Performance Criteria	Parameters	Existing analysis	Rappresentation	Score
Exit control	Immediacy of control	Only two access points to the village		●●●
	Unbrtrusiveness	Immediately recognizable access points		●
Wandering paths	Continuity	Presence of a circular path connecting the entire village		●●●●
	Wayfinding	Presence of recognizable landmarks		●●
Hospital rooms	Privacy	Not applicable in the pre-construction phase. Relevant in the design phase		Not ranked
	Personnalisation			
Common areas	Quantity	Not applicable in the pre-construction phase. Relevant in the design phase		Not ranked
	Variability			
External freedom	Availability	Presence of a garden but limited gathering spaces		●●
	Support	Lack of facilities/equipment for interacting with the environment		
Residentiality	Size	Not applicable in the pre-construction phase. Relevant in the design phase		Not ranked
	Familiarity			
Support for independence	Safety	Small size of the village with limited access		●●●
	Environmental prosthetics	Presence of architectural barriers		●
Sensory comprehension	Noise management	Absence of uncontrolled noise sources		●●●●●
	Comprehensibility	External sensory stimuli of natural origin		●●●●●

reuse and retrofit of existing built heritage and to energy efficiency interventions, including the principle of minimum intervention, understood as limiting transformations to those strictly necessary to ensure adaptability, safety, accessibility and orientation, while respecting existing characteristics.

The fourth phase, aimed at constructing the meta-project model and verifying its transferability, organises the recurring elements emerging from the case study analysis into a synthesis dataset, in which each element is described by its incidence and the conditions for its adaptability across different contexts. On this basis, the transition from recurring patterns to the model was carried out through a process of abstraction and synthesis, aimed at reducing specific solutions to general principles and making them independent from individual cases. The selected elements were then reorganised into a metaproject dataset, structured as a set of principles and strategies organised in three steps: 1) development of the building programme, understood as the definition of functions, spatial provisions and usage relationships; 2) definition of the organisational-functional layout, relating to the configuration and articulation of spaces and circulation paths; 3) identification of performance requirements and related solutions.

The fifth phase, dedicated to the applied verification of the meta-project model on a pilot case, is carried out following a transferability protocol that

systematically integrates the datasets defined in the previous phases and is organised as a multi-level procedure comprising:
– Configurational verification, based on the comparison between the morphological elements of the model and the conditions of the context, using the urban dataset derived from the second phase, in which the Critical Performance Criteria of the Environmental-Behaviour Model are translated into variables and spatial indicators; the verification makes use of configurational analysis tools and operational parameters calculated by DepthmapX, as well as qualitative indicators relating to continuity of paths, control of access points, legibility and spatial organisation, also integrating the morphological patterns emerging from the comparative dataset of case studies (phases 1 and 4), such as village structure, looped pathways and the presence of protected open spaces;
– Functional verification, based on the correspondence between the building programme and the spatial resources available in the context, verifying aggregation, organisation and modes of use defined in the meta-project model (phase 4) and compliance with the analytical dataset of case studies (phase 1), which includes variables relating to services, management models, care approaches and forms of social interaction; this verification integrates the identified functional patterns, assessing the coherence between proposed solutions and recurring organisational structures (e.g. division into units, integration of services, therapeutic and social activities), as well as their adaptability to the conditions of the pilot case;
– Performance verification, carried out through the association between requirements and design solutions, using the building dataset defined in phase 3, structured into thematic categories (accessibility, supportive spatial capacity, technological integration, sustainability) and integrated with the relationships between performance requirements and technical solutions; the verification considers conditions of safety, accessibility, orientation, support for autonomy and sensory quality, through observable variables and qualitative descriptors, including strategies for reuse and retrofit of heritage and the principle of minimum intervention.

The evaluation is supported by a mapping of correspondences between the components of the model and the characteristics of the pilot case, integrating: the frequency of recurring elements derived from the analysed case studies, the degree of adaptability with respect to dimensional, configurational and operational constraints of the context, and the coherence between observed variables, indicators and design solutions, as defined in the analytical datasets of the different phases.

Case study analysis | The analysis examines case studies of innovative residential models dedicated to people with dementia, taken as references for the development of the meta-project model; although these experiences are situated in different geographical and institutional contexts, they share the objective of overcoming the traditional model of residential care facilities, favouring spatial and organisational configurations oriented towards reproducing conditions of everyday life, as similar as possible to domestic and community contexts (Verbeek et alii, 2009).

The selection of case studies followed the sampling protocol defined in Phase 1 and is based on two complementary interpretative keys: on the one hand, Italian facilities were identified, selected for their coherence with the proposed model of distributed care infrastructure to be located in 'borghi', in terms of size, organisational structure and funding models; on the other hand, international cases of particular relevance in the disciplinary debate on architectures for dementia (Quesada-García, Valero-Flores and Lozano-Gómez, 2024) were considered as design and care references. The selection was also guided by criteria related to settlement morphology: all the analysed cases present a closed village structure, organised into housing units arranged in residential clusters (Fig. 2). In terms of services and care approach, preference was given to informal structures capable of recreating everyday life dynamics within protected environments, characterised by a strong architectural identity, use of colour and a high degree of spatial personalisation.

In the Italian context, three significant examples are considered. Casa Paese di Cicala (CZ) is an important reference for research, as it is a facility located in a small borgo at the foothills of the Sila, dedicated to people with early-stage Alzheimer's disease. The strong recognisability of spaces, achieved by fusing thematic environments, constitutes a significant strength, as these are conceived to facilitate orientation and support residents' memory (Fig. 3). However, the development of the facility within a single building represents a significant limitation, reducing access to open spaces and limiting the variety of possible daily activities. These are often reduced to simulated scenarios which, in current configuration, take the form of painted scenes on walls rather than usable spaces.

This approach also represents the main critical issue of the case study from a transferability perspective: a project applicable to different contexts must ensure authentic spaces and real activities, avoiding simulation as a substitute for direct experience, as it risks impoverishing rather than enriching the quality of the therapeutic environment. The elements transferable to a generalised model instead concern the choice of the borgo as a settlement context and, above all, the principle of spatial recognisability through thematic differentiation of environments, which represents an effective and replicable strategy in small-scale contexts. Paese Ritrovato di Monza is structured into dwellings, services and collective spaces organised according to a logic of proximity and community life that reproduces the structure of a borgo, with housing units overlooking public spaces. This configuration constitutes the model's main strength: it supports self-determination and freedom of movement within a protected environment (Fig. 4), while the domestic-type care model sustains residual autonomy by integrating staff support into everyday activities. The limitations are marginal, as the design choices are overall consistent with the requirements of a high-quality therapeutic environment. The main critical issue, however, arises from a perspective of generalisation: the facility is newly built, artificially recreating small-scale environments.

The elements transferable to a generalised model concern the morphological structure, which



Fig. 9 | Borgo di Cicignano: the square, the Church of Saints Peter and Paul, and the circular pathway connecting the spaces of the borgo (credit: A. Mezzalana, 2024).

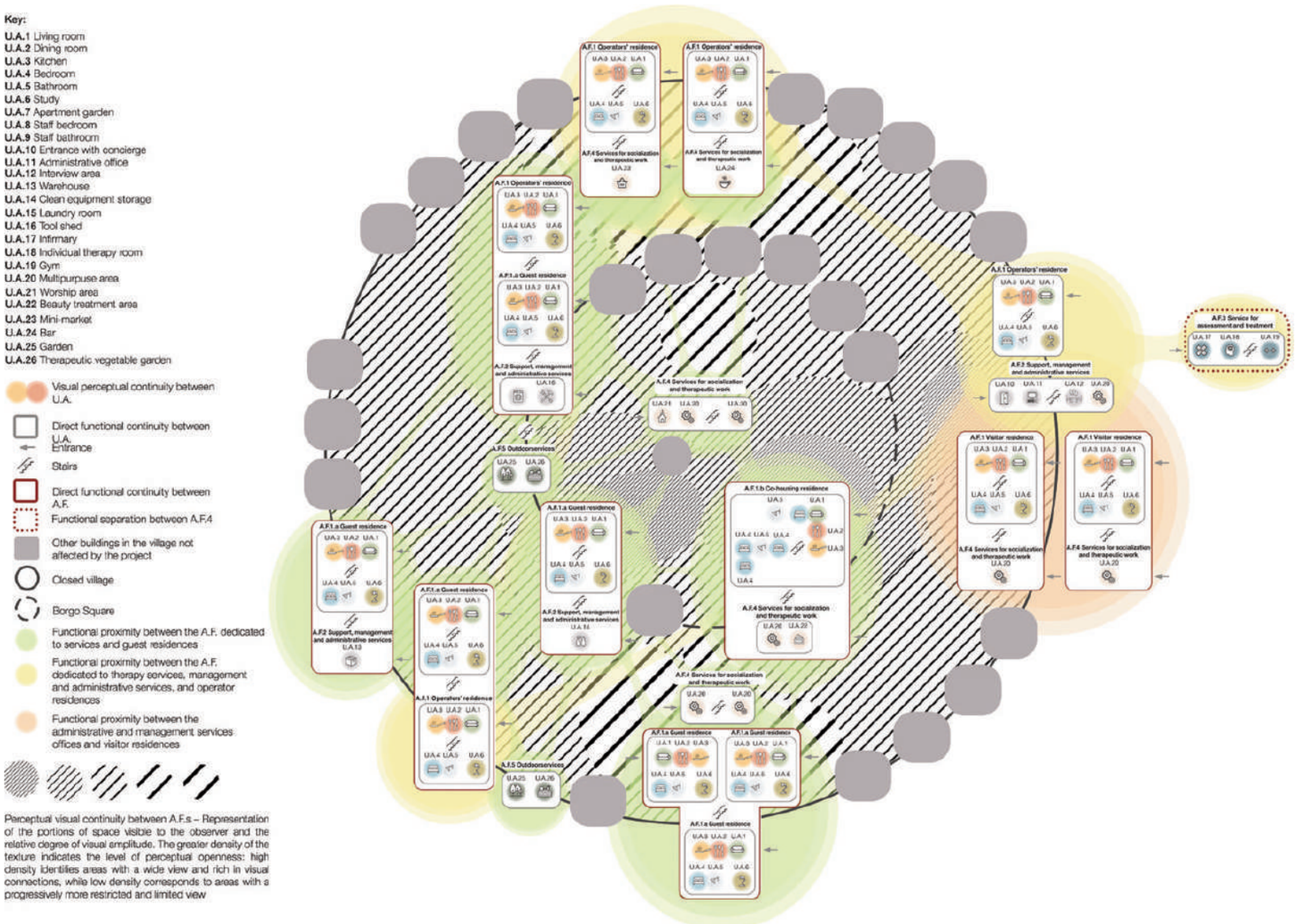


Fig. 10 | Application of the meta-project model to the Borgo di Cicignano: relationships between functional areas and environmental units of the pilot project (credit: A. Mezzalana, 2026).

is coherent with that of historic 'borghi' and therefore directly replicable, and the care model, which integrates health and care staff into residents' daily lives in a natural and non-intrusive manner, representing an effective and adaptable strategy across different contexts.

The third case, Villaggio Emanuele di Roma, is structured into residential units and collective spaces inspired by international dementia village models, aimed at maintaining residual capacities, safety, and the continuity of everyday life practices for residents in the mild and moderate stages of the disease. The organisation of spaces according to a community-life logic and the quality of accessibility of internal environments constitute significant design elements.

Limitations arise due to the facility's larger scale, which is greater than that of the other analysed cases. The absence of a central square or a clearly recognisable spatial reference element compromises the overall legibility of the system, making orientation more difficult for residents. This is compounded by the lack of thematic differentiation of buildings, which, in a larger-scale context, could have compensated for the reduced morphological compactness by providing distributed visual and spatial reference points. These limitations also represent the main critical issues from a generalisation perspective: a model applicable to 'borghi' of varying sizes should ensure both the presence of a recognisable spatial core and a morphological or thematic differentiation of buildings.

Transferable elements include the structuring and accessibility of internal environments, which represent effective and replicable strategies.

At an international level, the study examines some of the most representative models in the experimentation of residential care for dementia. De Hogeweyk Dementia Village (Weesp, Netherlands) is one of the first examples of an Alzheimer village, organised around differentiated lifestyles and based on a salutogenic approach, in which the built environment becomes an integral part of the care process. The ability to reproduce recognisable, thematically distinct environments designed to evoke everyday life contexts constitutes the model's main strength, which has demonstrated the therapeutic effectiveness of a built environment intentionally designed to support orientation, autonomy, and well-being in people with dementia.

The main limitation lies in the scale of the facility, which makes direct replication difficult in the context of Italian inland areas, characterised by regulatory, economic and morphological constraints incompatible with such interventions. Transferable elements concern the founding principle of the Alzheimer village: typological and thematic differentiation of environments and integration between residential and collective spaces according to a community-life logic, all of which form the basis for defining a generalisable model.

Village Landais Alzheimer (Dax, France) proposes an organisation into residential neighbourhoods with shared services and strong landscape integration, promoting continuity between living spaces and accessible open areas. The Furuset Hageby project (Oslo, Norway) combines the dementia village model with garden city principles, introducing environmental sustainability strategies and enhancing the relationship with nature as a therapeutic and relational element, as well as a landmark function.

These two case studies share a design approach based on the integration between residential spaces and the natural environment, which constitutes a significant strength. However, the scale of the interventions and the consequent lack of a clear definition of spatial boundaries represent a major limitation: uncontrolled permeability between interior and exterior spaces may generate disorientation and increase the risk of wandering.

This aspect also represents the main critical issue from a generalisation perspective: a model applicable across contexts must ensure that the relationship with open space is direct yet controlled.

The most relevant transferable element is the relationship with nature as a therapeutic and orienting resource, which must, however, be integrated within a controlled, small-scale framework to preserve its benefits without introducing risks associated with spatial dispersion. The comparison between these experiences makes it possible to identify several recurring requirements in terms of spatial aggregation and environmental legibility, as well as functional aspects and care approaches (Fig. 5). Firstly, there is a recurring use of aggregation patterns based on a settlement logic of small neighbourhoods or villages, composed of small-scale housing units and collective spaces arranged along clearly recognisable pathways: this configuration promotes the creation of familiar and easily understandable environments, helping to reduce the disorientation often associated with traditional healthcare facilities.

A second recurring element concerns the integration between residential functions, services and social spaces. Housing units are complemented by places that reproduce everyday activities – squares, shops, cafés, workshops – which allow residents to maintain familiar habits and routines, reinforcing their sense of belonging to the community. Another significant aspect concerns the design of open spaces and their relationship with the landscape: therapeutic gardens, circular pathways, and accessible green areas are key elements in ensuring freedom of movement in safe conditions, offering sensory stimuli and opportunities for outdoor activities.

From a management perspective, the case studies highlight diversified organisational models, ranging from public management to structures run by foundations and third-sector organisations, often within public-private partnerships. The comparative analysis thus enables the identification of spatial configurations, organisational models, and environmental strategies transferable to the metaproject settlement model. In particular, the application of these principles to small 'borghi' and small-scale residential contexts may provide a reference for proposing new care infrastructures that integrate housing, proximity services, and community relationships to support people with dementia (De Boer et alii, 2018).

Meta-project model | The comparative analysis of dementia care facilities has made it possible to identify recurring spatial configurations and organisational modes that, despite the diversity of architectural and managerial solutions, share some fundamental principles: the transformation of care environments towards a more domestic dimension, giving rise to spaces capable of fostering well-being, comfort and a sense of belonging (Spadolini and Parodi, 2025); the recognisability of spaces; and the integrated presence of residences, healthcare services, and social spaces in relation to dedicated open areas. These elements constitute the criteria for transitioning from recurring patterns observed in the case studies to the meta-project model of distributed care infrastructure in 'borghi', oriented to accommodate people affected by Alzheimer's disease in the early stages of the condition, as well as care and health and care staff (Tab. 2). The model interprets the borgo as a settlement system capable of integrating residential functions, care provision and social relationships within the consolidated urban fabric, enhancing the presence of the resident community and promoting forms of interaction and mutual benefit between care services and local life. Based on the analysis of case studies and comparison with the scientific literature on dementia care facilities (Del Nord, 2002), several homogeneous functional areas were identified to structure the model: residential areas; spaces for socialisation and therapeutic and rehabilitative activities; healthcare services; support services; and outdoor spaces for recreational and sensory activities. Within these areas, environmental units are structured, including independent or shared housing units, spaces for domestic activities, environments for occupational therapy, meeting spaces, and proximity services.

On this basis, a building programme was developed (Tab. 3), defining environmental units, planned activities and indicative surface areas derived from the analysis of minimum dimensional requirements established by regional regulations for facilities intended for people with Alzheimer's disease, translating user needs into operational guidelines for the reuse of existing built heritage. The programme thus serves as a guiding tool for the spatial organisation of the distributed structure and for the dimensioning of the building components that comprise it. At the same time, the meta-project model integrates performance requirements and the related design solutions (Tab. 4); in particular, it considers several classes of requirements (safety, well-being, usability, perceptual quality and management) identified by the technical standard UNI 8289 (UNI, 1981), specified into requirements tailored to environments for people with cognitive decline.

Among these, particular importance is attributed to user safety requirements related to the prevention of falls, impacts, and disorientation, as well as to environmental well-being (control of thermal-hygrometric, acoustic, and lighting conditions). These are accompanied by requirements related to usability and accessibility, including the elimination of architectural, sensory and cognitive barriers, the possibility of personalising environments and the use of easily interpretable signage systems. Attention is also given to perceptual quality and spatial legibility; studies by Roger Ulrich (1984) and by Spadolini and Parodi (2025) on the relationship between built environments and psychophysical well-being demonstrate how factors such as light, colour, materiality and spatial configuration can positively influence quality of life. These requirements are translated into design solutions that include the use of AAL (Ambient Assisted Living) technologies for monitoring residents, energy-efficiency and retrofit strategies, and the adoption of inclusive design principles.

Based on the developments described above, meta-project schemes for spatial organisation were elaborated (Fig. 6), based on the relationships between environmental units and aggregation criteria. These schemes do not define a rigid model, but rather an open and adaptable structure capable of responding to the morphological specificities of 'borghi', thus forming a knowledge base able to guide design decisions.

Application to Borgo di Cicignano | Borgo di Cicignano (RI) was selected as a pilot case for the experimentation of the distributed residential model dedicated to people with Alzheimer's disease, due to its planimetric characteristics and its coherence with the three structural factors identified as drivers of the study: population ageing, depopulation of 'borghi' and the increasing incidence of neurodegenerative diseases.

A small settlement of Roman origin with a circular layout of medieval derivation, Cicignano extends over an area of approximately 7,000 m^2 and includes 48 buildings, a square and a garden (Fig. 7). The built heritage is predominantly residential, consisting of 46 housing units, fewer than one third of which are permanently inhabited, as well as a church and a former school building. It is reasonable to assume that a portion of the elderly population residing in the borgo and in the surrounding areas – often strongly attached to the territory – may currently be, or in the future become, affected by neurodegenerative conditions, thus constituting a privileged pool of potential users for the proposed facility.

The spatial compatibility of the borgo was verified using two complementary analytical tools defined in Phase 3 of the methodology: the Environmental-Behaviour Model and Urban Spatial Analysis, conducted with the DepthmapX software. The former made it possible to evaluate the Critical Performance Criteria, assigning scores that identify strengths and critical issues of spaces in relation to safety parameters, legibility of pathways, freedom of outdoor movement and sensory comprehension (Fig. 8). The latter highlighted the presence of connected and visually integrated pathways, high internal accessibility and spatial control favourable to the safety and autonomy of residents. The comparison between the defined requirements and the planimetric configuration of the borgo revealed significant morphological and functional coherence, which formed the basis for the design experimentation.

The pilot project for a distributed Alzheimer Centre in Cicignano necessarily engages with the complexity of the existing built fabric, requiring an approach capable of reconciling the historical morphological-settlement structure of the borgo (Fig. 9) with the functional, therapeutic and safety needs of a vulnerable user group: mediation between conservation and innovation thus becomes the organising principle of the design strategy.

The intervention was oriented towards three main objectives, namely sustainability, inclusion and user well-being, which were translated into corresponding design directions: reuse and adaptation of the existing heritage, aimed at limiting land consumption; energy retrofit, aimed at improving the performance of historic buildings; and adaptation in terms of accessibility and integration of smart systems, in order to ensure safe, functional and inclusive environments.

Interior spaces were redesigned according to the principles of Universal and Inclusive Design, incorporating assisted mobility solutions and sensor systems, while outdoor spaces were equipped with ergonomic furniture, diffuse lighting, levelled paving, and augmentative signage. The meta-project model thus defined was subjected to applied verification (Fig. 10), associating requirements for safety, well-being, usability, perceptual quality, and

management with corresponding design solutions, thereby confirming its operational coherence and compatibility with the settlement fabric of the borgo.

Cicignano is not conceived merely as a physical container, but as a social and cultural system capable of enhancing place recognisability and sense of belonging, fundamental elements for the quality of life of people with Alzheimer's disease (Fig. 11). The adoption of innovative solutions, such as smart technologies and the conscious use of materials and colour schemes, makes it possible to balance functionality and aesthetic quality, while fully respecting the identity of the borgo.

Implications with respect to SDGs: benefits, synergies, and trade-offs | The research directly contributes to the achievement of several Sustainable Development Goals (SDGs) of the 2030 Agenda (UN, 2015); in particular to SDG 3, as it proposes a distributed settlement and architectural model aimed at supporting health, well-being, autonomy, and safety of people with Alzheimer's disease through recognisable, accessible environments capable of sustaining everyday care practices. With respect to SDG 10, the presented model addresses territorial inequalities in access to socio-care services, promoting forms of proximity-based welfare in marginal contexts. Direct implications can also be identified in relation to SDG 11, as the infrastructure interprets 'borghi' as inclusive, safe and sustainable settlements, based on the reuse of existing heritage and on the proximity between housing, services and social relationships, with an even more pronounced impact on SDG 13, thanks to the reduction of land consumption, the adaptive reuse of built heritage and the integration of energy retrofit interventions.

In terms of synergies, the model generates co-benefits with respect to SDG 1, as it may reduce forms of economic and social vulnerability associated with care dependency; to SDG 5, by partially alleviating the informal care burden, which often falls disproportionately on family caregivers, frequently women; and to SDG 8, through the activation of proximity services and local economies related to care. Furthermore, it relates to SDG 12, through the extension of the lifecycle of built heritage by means of reuse and adaptation; to SDGs 16 and 17, as its implementation requires forms of multilevel governance, institutional cooperation and partnerships among public, private and third-sector actors, according to a logic of intersectoral convergence and interinstitutional collaboration, which constitutes a necessary condition for any integrated urban regeneration strategy oriented towards achieving the SDGs (Ricci, Poli and Marino, 2025). Relations with SDG 9 also exist, but are conditional, limited to the dimensions of organisational, technological, and infrastructural innovation of the distributed care model, rather than the construction of new physical infrastructures.

Alongside these benefits, however, some potential trade-offs emerge. The introduction of assistive technologies, control devices and performance upgrades may create tensions with the complex balance between regeneration and environmental protection; moreover, functional adaptation interventions may require a delicate equilibrium between accessibility, safety, architectural compatibility and economic sustainability; finally, the stability of the model depends on the availability of financial resources and personnel, managerial competences and territorial networks capable of supporting its operation over time.



Fig. 11 | Borgo di Cicignano: design solutions for ground-floor residential units (credit: A. Mezzalana, 2024).

Overall, the relationship with the SDGs does not emerge as an automatic alignment, but rather as the result of a design-mediated process that balances health, inclusion, territorial regeneration, climate adaptation, and heritage protection, according to an integrated logic consistent with the 2030 Agenda.

Conclusions | The research explores the potential of interpreting depopulating 'borghi' as territorial care infrastructures, capable of integrating living, assistance, and proximity-based relationships in response to emerging needs related to population ageing and the spread of neurodegenerative diseases. The comparative analysis of innovative residential models for dementia and the definition of a meta-project model have enabled the identification of spatial, organisational, and performance criteria potentially transferable to small-scale settlement contexts. The application to Borgo di Cicignano (RI) highlights a significant compatibility between the environmental, technological and managerial requirements of facilities dedicated to the care of Alzheimer's disease in the early stages and the morphological and relational characteristics of small historic settlements, suggesting the possibility of developing forms of distributed care integrated within the existing urban fabric.

The research demonstrates the possibility of developing residential models for dementia, not necessarily ex novo, but derived from the adaptation of existing settlement systems, provided that specific requirements for spatial, organisational, and performance compatibility are met. The model's transferability, however, is subject to a set of enabling conditions and critical factors. Among these, particular importance is attributed to regulatory constraints concerning safety and accessibility which, although necessary, may limit the possibilities for intervention on historic buildings, requiring specific and non-standardised design solutions; medium- to long-term economic and managerial sustainability, linked both to adaptation and operational costs and to the ability to activate stable organisational and financial models; and the availability of qualified personnel for the management of care services, a determining factor especially in marginal contexts characterised by a shortage of professional resources.

These are accompanied by socio-territorial factors, such as the consensus and involvement of local communities, which are essential to ensure the acceptability and integration of care functions within the existing fabric, and the presence of an adequate local healthcare provision, necessary to support care functions and ensure continuity of services. Additional critical issues include the fragmented ownership of built heritage, which may hinder coordinated processes of reuse and transformation, and the need to mediate between conservation requirements and functional adaptation interventions. These factors outline a non-uniform feasibility framework that requires adaptive approaches, integrated governance tools, and differentiated strategies tailored to the specific characteristics of each context.

In terms of implications, the research suggests a strengthening of the technological approach to architectural design, understood as a device for integrating space, services, and communities, thereby contributing to the redefinition of the role of 'borghi' within territorial welfare policies. At the policy level, the need arises for regulatory and programmatic tools to support adaptive reuse interventions oriented towards care, promoting flexible and integrated organisational models. In relation to welfare systems, the proposed model aligns with a transition towards forms of proximity-based care (Pollo, Biolchini and Scognamiglio, 2023), which require coordination between the local scale and broader territorial networks, as promoted by the PNRR[1] and by Ministerial Decree 77/2022 (Ministero della Salute, 2022).

The exploratory nature of the experimentation, based on the application of the model to a first pilot case, represents a limitation of the study. Although it allows verification of the coherence between the identified requirements and the morphological characteristics of the analysed context, the model's transferability will require further experimentation in 'borghi' with different settlement, demographic, and infrastructural conditions. Additional applications are currently underway in territorial contexts within the Lazio region, aimed at validating and refining the model and verifying its adaptability to the availability of built heritage, the provision of healthcare services, and the socio-demographic structure of local communities.

In line with the initial results, future developments may focus on participatory design processes involving healthcare stakeholders, local administrations, socio-care operators, and the resident population, to better assess the social, organisational, and economic sustainability of the proposed solutions. In this direction, a structured mapping of public and private stakeholders is currently being developed, aimed at highlighting the roles and contributions of different actors across the various phases of planning, design, and management of regeneration interventions, using stakeholder analysis tools (Bottero and Datola, 2020). These outcomes may strengthen the social impact of interventions and integrate care services into existing community networks.

In light of the findings and the results achieved, 'borghi' can be reinterpreted as nodes within a distributed territorial care system, capable of connecting urban regeneration, innovation in care models, and the development of new social infrastructures for vulnerable communities, contributing to redefining the role of inland areas no longer as marginal contexts, but as active fields of design and social experimentation. It is emphasised that the relationship between health and the built environment cannot be reduced to a purely performance-based dimension, but requires integration between spatial configuration, service organisation and practices of use. Finally, adaptive reuse of built heritage emerges not only as a conservation strategy but as an operational device for the construction of new territorial welfare models, highlighting both its potential and the critical conditions for its implementation.

Acknowledgements

The research was developed within the project entitled Indicators of sustainable regeneration of 'borghi' and interventions for the reuse of built heritage for distributed hospitality, funded by the 'Sapienza' University of Rome (2022-2025), under the scientific responsibility of Prof. Teresa Villani. The research activities were carried out in collaboration with the Centro per l'Autonomia Cooperative of Rome as institutional partner, and with the support of the Municipality of Collevecchio (RI), of which Borgo di Cicignano is a hamlet. The case study of Cicignano served as a pilot context for the applied experimentation of the meta-project model, enabling verification of its coherence, adaptability and conditions of transferability with respect to a real historic settlement fabric. The research, completed in 2025, has opened the way to further integrative developments, of which the present work represents an initial outcome.

Note

1) For more information, see the webpage: pnrr.salute.gov.it/it/pnrr-pagina/piano-nazionale-di-ripresa-e-resilienza-cose-la-missione-salute/ [Accessed 14 April 2026].

References

Amodio, T. (2021), "Una lettura della marginalità attraverso lo spopolamento e l'abbandono nei piccoli comuni | A reading of marginality through depopulation and abandonment in small municipalities", in *Bollettino della Associazione Italiana di Cartografia*, vol. 172, pp. 50-65. [Online] Available at: doi.org/10.13137/2282-572X/33544 [Accessed 10 April 2026].

Attaianese, E., Barilà, M. and Perillo, M. (2025), "Exploring Neuroscientific Approaches to Architecture – Design Strategies of the Built Environment for Improving Human Performance", in *Buildings*, vol. 15, issue 19, article 3524. [Online] Available at: doi.org/10.3390/buildings15193524 [Accessed 14 April 2026].

Barbera, F., Censonimo, D. and De Rossi, A. (2022), *Contro i borghi – Il Belpaese che dimentica i paesi*, Donzelli, Roma.

Baró Zarzo, J.-L., Poyatos Sebastián, J. and Martínez Martínez, N. (2020), "Contrastare lo spopolamento nell'entroterra della Spagna – Proposte tra Arte, Design e Architettura | Fighting against depopulation in inland Spain – Alternatives from Art, Design and Architecture", in *Agathón | International Journal of Architecture Art and Design*, vol. 8, pp. 138-147. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/8132020 [Accessed 10 April 2026].

Battaino, C., Fossati, P. and Marconi, F. (2025), "Ripensare l'abitare – Progetto e architettura per un abitare flessibile e accessibile | Rethinking housing – Design and architecture for flexible and affordable living", in *Agathón | In-*

ternational Journal of Architecture, Art and Design, vol. 17, pp. 156-167. [Online] Available at: doi.org/10.69143/2464-9309/17102025 [Accessed 10 April 2026].

Bottero, M. and Datola, G. (2020), "Addressing social sustainability in urban regeneration processes – An application of the social multi-criteria evaluation", in *Sustainability*, vol. 12, issue 18, article 7579, pp. 1-20. [Online] Available at: doi.org/10.3390/su12187579 [Accessed 10 April 2026].

Brignoni, M., Dall'Osso, G., Gasparotto, S. and Varini, R. (2023), "Mappatura dei processi design-driven per la rigenerazione delle piccole città fortificate in aree interne | Mapping design-driven processes for the regeneration of small fortified towns in inland areas", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 13, pp. 281-290. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/13242023 [Accessed 10 April 2026].

Carrosio, G. (2019), *I margini al centro – L'Italia delle aree interne tra fragilità e innovazione*, Donzelli, Roma.

Chaza Chimeno, M. R., Revellini, R. and Cellucci, C. (2024), "Invecchiamento della popolazione e spazi urbani – Nuove sfide digitali per il benessere degli anziani | Ageing population and urban spaces – New digital challenges for elderly well-being", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 16, pp. 98-107. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/1682024 [Accessed 10 April 2026].

Chen, L.-M., Lee, Y., Nguyen, D., Choi, S. D. (2025), "Technology that supports extending dementia-friendly community-based care – A scoping review", in *Current Geriatrics Reports*, vol. 14, article 21, pp. 1-24. [Online] Available at: doi.org/10.1007/s13670-025-00446-x [Accessed 10 April 2026].

Coleman, R. (1994), "The Case for Inclusive Design – An Overview", in International Ergonomics Association (eds), *Proceedings of the 12th Triennial Congress International Ergonomics Association and the Human Factors Association of Canada*, *Toronto, Canada, August 15-19, 1994*, Human Factors Association of Canada, Toronto, pp. 1-6. [Online] Available at: it.scribd.com/document/712869947/THE-CASE-FOR-INCLUSIVE-DESIGN [Accessed 10 April 2026].

Day, K., Carreon, D. and Stump, C. (2000), "The therapeutic design of environments for people with dementia – A review of the empirical research", in *The Gerontologist*, vol. 40, issue 4, pp. 397-416. [Online] Available at: doi.org/10.1093/geront/40.4.397 [Accessed 10 April 2026].

De Boer, B., Beerens, H. C., Katterbach, M. A., Viduka, M., Willemse, B. M. and Verbeek, H. (2018), "The physical environment of nursing homes for people with dementia – Traditional nursing homes, small-scale living facilities, and green care farms", in *Healthcare*, vol. 6, issue 4, article 137, pp. 1-12. [Online] Available at: doi.org/10.3390/healthcare6040137 [Accessed 10 April 2026].

Del Nord, R. (2002), *Architettura per l'Alzheimer – Il malato di Alzheimer e l'ambiente*, Regione Toscana, Firenze. [Online] Available at: regione.toscana.it/documents/10180/23556/Architettura+per+l%27Alzheimer+-+Volume+Primo/854f10d7-9c59-4a94-8d38-91ff98d3cc6c?version=1.0 [Accessed 10 April 2026].

Fazeli Dehkordi, Z. S., Khatami, S. M. and Ranjbar, E. (2022), "The Associations between urban form and major non-communicable diseases – A systematic review", in *Journal of Urban Health*, vol. 99, pp. 941-958. [Online] Available at: doi.org/10.1007/s11524-022-00652-4 [Accessed 10 April 2026].

Fiorini, L., Saganeiti, L., Perazzini, M., Bontempo, D., Bucci, M., Giancola, M. and Perilli, E. (2025), "L'impatto dei modelli urbani sul supporto sociale – Tra giustizia spaziale e sviluppo sostenibile | The impact of urban models on social support – Between spatial justice and sustainable development", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 17, pp. 196-207. [Online] Available at: doi.org/10.69143/2464-9309/17132025 [Accessed 10 April 2026].

Fleming, R., Bennett, K., Preece, T. and Phillipson, L. (2017), "The development and testing of the dementia friendly communities environment assessment tool (DFC EAT)", in *International Psychogeriatrics*, vol. 29, issue 2, pp. 303-311. [Online] Available at: doi.org/10.1017/S1041610216001678 [Accessed 10 April 2026].

Gan, D. R. Y., Chaudhury, H., Mann, J. and Wister, A. V. (2022), "Dementia-Friendly Neighborhood and the Built Environment – A Scoping Review", in *The Gerontologist*, vol. 62, issue 6, pp. e340-e356. [Online] Available at: doi.org/10.1093/geront/gnab019 [Accessed 14 April 2026].

Ghamari, M., Suvish, Dehkordi, A. A., See, C. H., Sami, A., Yu, H. and Sundaram, S. (2025), "Dementia Friendly Buildings – Approach on Architectures", in *Buildings,* vol. 15, article 385, pp. 1-37. [Online] Available at: doi.org/10.3390/buildings15030385 [Accessed 14 April 2026].

Hillier, B. (2007), *Space is the machine – A configurational theory of architecture*, Space Syntax, London. [Online] Available at: discovery.ucl.ac.uk/id/eprint/3881/1/SITM.pdf [Accessed 10 April 2026].

Istituto Superiore di Sanità (2024), *Progetto Fondo per l'Alzheimer e le demenze – Le attività dell'Osservatorio demenze dell'Istituto Superiore di Sanità (anni 2021-2023) – Report Nazionale*, Istituto Superiore di Sanità, Roma. [Online] Available at: demenze.it/documenti/schede/report_nazionale.pdf [Accessed 10 April 2026].

Krier, D., de Boer, B., Hiligsmann, M, Wittwer, J. and Amieva, H. (2023), "Evaluation of dementia-friendly initiatives, small-scale homelike residential care, and dementia village models – A scoping review", in *JAMDA | Journal of the American Medical Directors Association,* vol. 24, issue 7, pp. 1020-1027. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.jamda.2023.03.024 [Accessed 10 April 2026].

Long, S., Benoist, C. and Weidner, W. (2023), *World Alzheimer Report 2023 – Reducing dementia risk – Never too early, never too* late, Alzheimer's Disease International, London (UK). [Online] Available at: alzint.org/u/World-Alzheimer-Report-2023.pdf [Accessed 10 April 2026].

Marquardt, G. and Schmieg, P. (2009), "Dementia-friendly architecture – Environments that facilitate wayfinding in nursing homes", in *American Journal of Alzheimer's Disease & Other Dementias*, vol. 24, issue 4, pp. 333-340. [Online] Available at: doi.org/10.1177/1533317509334959 [Accessed 10 April 2026].

Marquardt, G., Bueter, K. and Motzek, T. (2014), "Impact of the design of the built environment on people with dementia – An evidence-based review", in *HERD | Health Environments Research & Design Journal*, vol. 8, issue 1, pp. 127-157. [Online] Available at: doi.org/10.1177/193758671400800111 [Accessed 10 April 2026].

Ministero della Salute (2022), "Decreto 23 maggio 2022, n. 77 – Regolamento recante la definizione di modelli e standard per lo sviluppo dell'assistenza territoriale nel Servizio sanitario nazionale", in *Gazzetta Ufficiale*, Serie Generale, n. 144 del 22/06/2022. [Online] Available at: gazzettaufficiale.it/eli/id/2022/06/22/22G00085/SG [Accessed 14 April 2026].

Piazzoni, C. and Terraneo, M. (2025), "Le disuguaglianze territoriali di salute in Italia", in Perocco, F. and Pirina. G. (eds), *Le disuguaglianze territoriali in Italia – Cause, forme, conseguenze*, Edizioni Ca' Foscari – Venice University Press, Venezia, pp. 143-161. [Online] Available at: doi.org/10.30687/978-88-6969-991-7/005 [Accessed 10 April 2026].

Pollo, R., Biolchini, E. and Scognamiglio, V. (2023), "Progettare le Case della Comunità – Applicazione dell'approccio modulare a un modello innovativo di presidio | Designing Community Houses – Application of the modular approach to an innovative model of facility", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 14, pp. 224-235. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/14192023 [Accessed 10 April 2026].

Preiser, W. F. E. and Ostroff, E. (2001), *Universal Design handbook*, McGraw-Hill, New York.

Presidenza del Consiglio dei Ministri – Dipartimento per le politiche di coesione e per il Sud (2021), *Evoluzione del requisito associativo nella Strategia Nazionale per le Aree Interne – Linee Guida 2021-2027*, Roma. [Online] Available at: politichecoesione.governo.it/media/k1ahol2s/4_evoluzione-del-requisito-associativo-nella-snai-linee-guida-2021-2027.pdf [Accessed 10 April 2026].

Quesada-García, S., Valero-Flores, P. and Lozano-Gómez, M. (2024), "Residential care facilities for users with Alzheimer's disease – Characterisation of their architectural typology", in *Buildings*, vol. 14, issue 10, article 3307, pp. 1-45. [Online] Available at: doi.org/10.3390/buildings14103307 [Accessed 10 April 2026].

Rao, M., Prasad, S., Tissera, H. and Adshead, F. (2007), "The built environment and health", in *The Lancet*, vol. 370, issue 9593, pp. 1111-1113. [Online] Available at: doi.org/10.1016/S0140-6736(07)61260-4 [Accessed 10 April 2026].

Ricci, M., Battisti, A. and Monardo, B. (2014), *I borghi della salute – Healthy ageing per nuovi progetti di territorio,* Alinea, Firenze.

Ricci, L., Poli, I. and Marino, M. (2025), "Welfare urbano e rigenerazione – Sostenibilità e inclusione sociale per il raggiungimento degli SDG | Urban welfare and regeneration – Sustainability and social inclusion for achieving the SDGs", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 17, pp. 94-107. [Online] Available at: doi.org/10.69143/2464-9309/1752025 [Accessed 10 April 2026].

Setola, N. and Borgianni, S. (2025), "Promuovere salute e benessere – Strumenti per il progetto di Case della Comunità e quartieri sani | Promoting health and well-being – Tools for designing community health centres and healthy neighbourhoods", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 17, pp. 226-241. [Online] Available at: doi.org/10.69143/2464-9309/17152025 [Accessed 10 April 2026].

Spadolini, M. B. and Parodi, L. (2025), "La forma segue l'emozione – Progettazione su misura e design rigenerativo negli ambienti di cura | Form follows emotion – Tailored design and regenerative approaches in healthcare environments", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 17, pp. 68-79. [Online] Available at: doi.org/10.69143/2464-9309/1732025 [Accessed 10 April 2026].

Ulrich, R. S. (1984), "View through a window may influence recovery from surgery", in *Science*, vol. 224, issue 4647, pp. 420-421. [Online] Available at: doi.org/10.1126/science.6143402 [Accessed 14 April 2026]

Ulrich, R. S., Berry, L. L., Quan, X. and Parish, J. T. (2010), "A conceptual framework for the domain of Evidence-based design", in *HERD | Health Environments Research & Design Journal*, vol. 4, issue 1, pp. 95-114. [Online] Available at: doi.org/10.1177/193758671000400107 [Accessed 10 April 2026].

UN – United Nations (2015), *Transforming our World – The 2030 Agenda for Sustainable Development*, document A/RES/70/1. [Online] Available at: sustainabledevelopment.un.org/index.php?page=viewandtype=111andnr=8496andmenu=35 [Accessed 14 April 2026].

UNI – Ente Italiano di Normazione (1981), *UNI 8289: 1981 – Building – Functional requirements of final users – Classification*. [Online] Available at: store.uni.com/en/uni-8289-1981 [Accessed 10 April 2026].

Verbeek, H., van Rossum, E., Zwakhalen, S. M. G., Kempen, G. I. J. M. and Hamers, J. P. H. (2009), "Small, homelike care environments for older people with dementia – A literature review", in *International Psychogeriatrics*, vol. 21, issue 2, pp. 252-264. [Online] Available at: doi.org/10.1017/S104161020800820X [Accessed 10 April 2026].

WHO – World Health Organization (2021), *Global status report on the public health response to dementia*. [Online] Available at: iris.who.int/server/api/core/bitstreams/9e8aab50-ca34-45e0-9fb0-26e675746f65/content [Accessed 10 April 2026].

Zeisel, J., Hyde, J. and Levkoff, S. (1994), "Best practices – An Environment Behavior (E-B) model for Alzheimer special care units", in *American Journal of Alzheimer's Care and Related Disorders & Research*, vol. 9, issue 2, pp. 4-21. [Online] Available at: doi.org/10.1177/153331759400900202 [Accessed 10 April 2026].

AGATHÓN – International Journal of Architecture, Art and Design | n. 19 | 2026 | pp. 118-133
ISSN print: 2464-9309 – ISSN online: 2532-683X | doi.org/10.69143/2464-9309/1972026

ARTICLE INFO

Received 10 March 2026
Revised 08 April 2026
Accepted 10 April 2026
Published 30 June 2026

RIUSO ADATTIVO COME INFRASTRUTTURA TERRITORIALE PER LE AREE RURALI

Valutazione con indicatori per il riuso a Moya (Spagna)

ADAPTIVE REUSE AS TERRITORIAL INFRASTRUCTURE FOR RURAL AREAS

Indicator-based evaluation of reuse in Moya (Spain)

Emma Barelles-Vicente, Maria Eugenia Torner-Feltrer,
Jaime Llinares Millán, Inmaculada Oliver-Faubel

ABSTRACT

In molti territori rurali marginali europei gli insediamenti storici abbandonati vengono conservati come ruderi consolidati, assicurando continuità materiale ma generando un modesto sviluppo socioeconomico. Il contributo sviluppa e applica un framework a quattro dimensioni, a scala insediativa, per verificare interventi di riuso adattivo già realizzati quali infrastruttura territoriale. Concentrandosi sull'ex Chiesa della Trinidad ricostruita a Moya (Spagna) lo studio valuta, attraverso indicatori verificabili, il livello di attivazione sociale, i flussi di visitatori in rapporto alla popolazione residente, la continuità della governance e la strategia di intervento. I risultati mostrano che il riuso adattivo può funzionare come infrastruttura produttiva regolamentata, coerente con gli SDG 9 e 10, sebbene il suo impatto territoriale dipenda dall'integrazione multiscalare e dalla stabilità della governance nel lungo periodo. Il quadro proposto offre uno strumento trasferibile per la valutazione ex post nei contesti rurali soggetti a spopolamento.

Across many European marginal rural territories, abandoned historic settlements are preserved as consolidated ruins, ensuring material continuity but generating limited socioeconomic activation. This paper develops and applies a four-dimensional settlement-scale framework to evaluate implemented adaptive reuse as territorial infrastructure. Focusing on the reconstructed former Church of La Trinidad in Moya (Spain), the study assesses social activation, visitor flows in proportion to the resident population, governance continuity, and intervention strategy through verifiable indicators. The results show that adaptive reuse functions a regulated productive infrastructure aligned with SDGs 9 and 10, although its territorial impact depends on multi-scalar integration and long-term governance stability. The framework offers a transferable tool for post-implementation evaluation in depopulating rural contexts.

KEYWORDS

riuso adattivo, spopolamento rurale, infrastruttura territoriale, modello di governance, valutazione alla scala insediativa

adaptive reuse, rural depopulation, territorial infrastructure, governance model, settlement-scale evaluation

Emma Barelles-Vicente, Building Engineer and PhD, is an Assistant Professor at the Department of Architectural Constructions, Polytechnic University of Valencia (Spain). Her research interests concern architectural heritage, adaptive reuse, building performance, and rehabilitation strategies for historic contexts. E-mail: ebarelle@arq.upv.es

Maria Eugenia Torner-Feltrer, Architect and PhD, is a Permanent Lecturer at the Department of Continuous Medium Mechanics and Theory of Structures, Polytechnic University of Valencia (Spain). Her research focuses on the structural behaviour of existing buildings and historic structures, and on assessment methods to support rehabilitation processes. E-mail: meutorfe@upvnet.upv.es

Jaime Llinares Millán, Architect and PhD, is an Associate Professor at the Department of Architectural Constructions, Polytechnic University of Valencia (Spain). His research focuses on architectural acoustics, historic buildings, and performance-based simulation applied to the adaptive reuse of historic architecture. E-mail: jllinares@csa.upv.es

Inmaculada Oliver-Faubel, Building Engineer, is a Lecturer at the Department of Architectural Constructions, Polytechnic University of Valencia (Spain). Her professional and academic activities focus on building technology, construction systems, and technical support for rehabilitation processes and architectural design. E-mail: inolfau@csa.upv.es

In Europa numerosi insediamenti rurali marginali, segnati da declino demografico e da ridotto accesso ai servizi, si caratterizzano per la presenza di tessuti storici abbandonati (Bizzarri and Micera, 2021; Lak, Gheitasi and Timothy, 2020): in molti casi questi siti sono stati conservati come ruderi consolidati, tutelati dalla normativa sul Patrimonio e mantenuti come testimonianze culturali delle precedenti strutture insediative (Plevoets and Van Cleempoel, 2019; Arfa et alii, 2022). Sebbene tale approccio assicuri la conservazione della materia storica, spesso non riesce a generare uno sviluppo socioeconomico duraturo né a contrastare le disuguaglianze territoriali strutturali.

Il dibattito recente si è pertanto orientato verso approcci sistemici e informati sui dati, capaci di mappare i processi di rigenerazione e valutarne gli impatti oltre la scala del singolo oggetto, in particolare nelle aree interne e nei piccoli insediamenti fortificati (Brignoni et alii, 2023). Parallelamente un numero crescente di studi ha collegato la rigenerazione delle aree rurali a modelli di governance e a quadri orientati agli Obiettivi di Sviluppo Sostenibile, sottolineando la necessità di connettere le strategie spaziali alla continuità d'uso e di gestione, nonché alle implicazioni socioeconomiche (Eixerés Ros, 2025). All'interno di una sempre più ampia agenda di transizione il Patrimonio culturale è sempre più interpretato non solo come valore da salvaguardare ma anche come possibile leva di politiche integrate che affrontano la transizione ecologica, la coesione territoriale e la sostenibilità nel lungo periodo (Casanovas, Alonso Campanero and Campisi, 2024; Foster, 2020).

Negli ultimi due decenni il riuso adattivo è emerso come alternativa strategica alle pratiche puramente conservative (Mısırlısoy and Günçe, 2016; Pintossi et alii, 2023), ridefinendo il Patrimonio edilizio come potenziale motore di rigenerazione. Tuttavia la valutazione delle prestazioni dopo l'intervento alla scala insediativa resta ancora poco esplorata, soprattutto nei contesti rurali (Augustiniok et alii, 2025). Minore attenzione è stata dedicata ai piccoli insediamenti rurali dove la continuità d'uso, gli assetti di governance e l'impatto territoriale misurabile degli interventi di riuso condizionano la loro efficacia nel lungo periodo. I quadri analitici per valutare il riuso già realizzato a scala insediativa restano limitati, in particolare nei territori a densità estremamente bassa, dove gli effetti proporzionali divergono da quelli osservati nei modelli urbani più grandi. Il presente studio si fonda su fonti verificabili, tra cui statistiche pubbliche, documentazione contrattuale e atti di progetto, garantendo trasparenza metodologica e replicabilità.

Alla luce di tali premesse il contributo sviluppa e mette alla prova un quadro di valutazione alla scala insediativa basato su indicatori attraverso il caso dell'insediamento fortificato di Moya (Spagna). Come illustrato nelle Figure 1 e 2 la sua posizione geografica, a distanza intermedia tra diversi capoluoghi di provincia e da vicini attrattori culturali, costituisce una variabile strutturale che influenza la fattibilità e la scalabilità dei processi di attivazione socioeconomica guidati dal Patrimonio. Lo studio è guidato da quattro obiettivi di ricerca tra loro interrelati, riguardanti la costruzione di indicatori misurabili alla scala insediativa capaci di cogliere le dimensioni sociali, territoriali, di governance e di intervento, la valutazione delle prestazioni socio-territoriali dopo il riuso di edifici storici ricostruiti, l'identificazione delle condizioni di governance e gestione che assicurano continuità nel lungo periodo oltre l'investimento pubblico iniziale e la valutazione della trasferibilità ad altri insediamenti rurali soggetti a spopolamento e caratterizzati da fragilità demografica strutturale.

L'originalità del contributo risiede nello spostamento dell'indagine dall'intenzione progettuale alla prestazione fornita dal riuso, attraverso un modello di valutazione replicabile per misurare l'impatto infrastrutturale dopo l'attuazione dell'intervento. L'articolo dapprima inquadra il riuso adattivo nel più ampio dibattito sulle infrastrutture territoriali e sulla fragilità rurale, successivamente definisce le condizioni di governance e il sistema di indicatori che fondano l'approccio metodologico, poi applica il quadro di valutazione al caso di Moya e infine discute il necessario coordinamento sistemico, le barriere strutturali, le condizioni di replicabilità e il contributo dello studio agli Obiettivi di Sviluppo Sostenibile (SDG) 9 e 10.

Stato dell'arte: il riuso adattivo come infrastruttura territoriale | Negli ultimi due decenni il riuso adattivo si è progressivamente spostato da un paradigma centrato sulla conservazione materiale verso prospettive territoriali e socioeconomiche più ampie. I primi studi valutavano infatti gli interventi in termini di autenticità del manufatto, consolidamento strutturale e compatibilità tipologica con nuove destinazioni, trattando gli edifici storici come manufatti isolati; le ricerche più recenti inquadrano invece il riuso del Patrimonio entro strategie più ampie di rigenerazione territoriale, capaci di collegare Beni culturali, transizione ambientale e sviluppo locale (Toscano, 2023; Baiani et alii, 2024; Fiorini et alii, 2025).

Gli studi più recenti e i documenti di indirizzo promossi dall'Unione Europea concettualizzano sempre più il Patrimonio come risorsa territoriale inserita nei sistemi socioeconomici, alimentando il dibattito in corso sulla trasformazione, sulla ricollocazione o sulla reinterpretazione dei manufatti storici nelle pratiche contemporanee di riuso adattivo (Tao, Chen and Aoki, 2025). Iniziative quali il programma Horizon Europe e la Council of Europe Framework Convention on the Value of Cultural Heritage for Society (Council of Europe, 2005) enfatizzano il Patrimonio come elemento di coesione, inclusione e sviluppo locale (UNESCO, 2023; Hussein and Alhebsi, 2025): in questa prospettiva il riuso adattivo non è più inteso soltanto come recupero edilizio, ma come potenziale componente di un'infrastruttura territoriale capace di generare occupazione, servizi e continuità istituzionale (Casanovas, Alonso Campanero and Campisi, 2024).

Le esperienze internazionali di rigenerazione rurale mettono in evidenza, in modo convergente, tanto le opportunità quanto i vincoli che accompagnano i processi di riattivazione dei Patrimoni marginali (Rudan, 2023; Proietti, 2024). Nel contesto spagnolo alcuni programmi promossi dallo Stato, come il PRUEPA, hanno attuato strategie di riuso educativo in insediamenti spopolati, tra cui Umbralejo, Granadilla e Búbal, dove l'occupazione e l'attivazione del Patrimonio sono state possibili grazie a modelli di gestione pubblica (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, n.d.). In questo quadro studi recenti hanno riletto il principio di reversibilità come strategia progettuale capace di mediare tra le esigenze di conservazione e l'introduzione di addizioni volumetriche nei contesti storicizzati (Fonti, 2024).

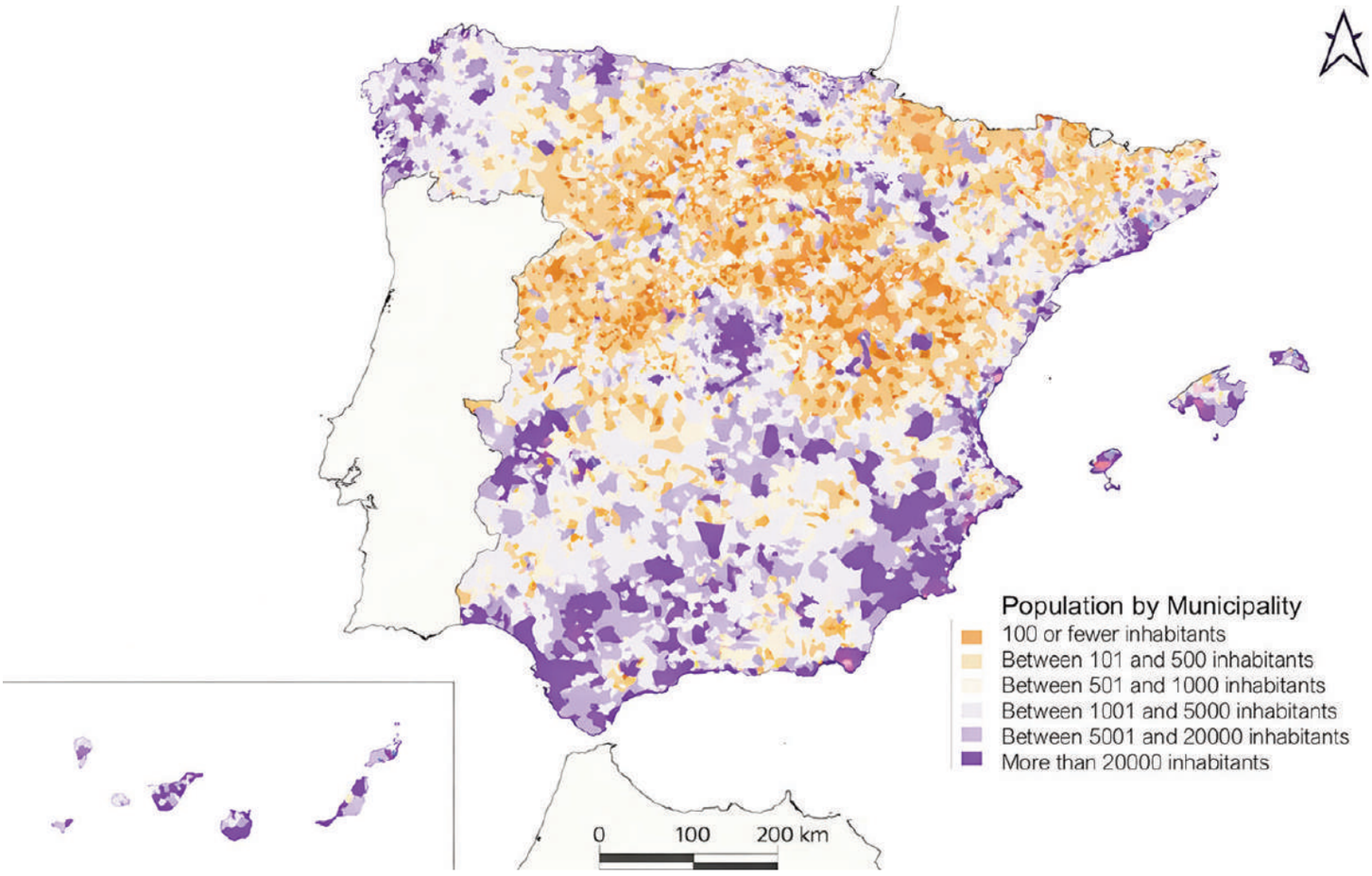
Parallelamente il riuso adattivo del Patrimonio attraverso interventi multifunzionali di ospitalità, servizi per i visitatori e attività culturali può generare flussi economici e ampliare il raggio di incidenza territoriale degli interventi. In questa direzione si collocano anche i più recenti quadri metodologici per il riuso adattivo in contesti tradizionali e vernacolari (Khalil and Üzümcüoglu, 2025). Brignoni et alii (2023) propongono ad esempio un sistema di classificazione fondato sulla temporalità degli interventi e sul coinvolgimento della comunità, utile a interpretare i processi di rigenerazione guidati dal progetto in piccoli insediamenti fortificati come Castelvecchio Calvisio (Fiorani, 2015), dove la sperimentazione metodologica ha contribuito ad allargarne le conoscenze sulla vulnerabilità sismica e sulle strategie di riuso.

Tali contributi convergono nel mostrare che la riattivazione del Patrimonio richiede una governance stabile e un effettivo coinvolgimento dell'intero territorio. La qualità architettonica di un Bene o di un intervento da sola non è sufficiente poiché accessibilità e posizione incidono in modo determinante sulla sostenibilità gestionale di lungo periodo. Per questa ragione i modelli di gestione cooperativi o basati su concessione sono stati individuati come variabili cruciali per garantire la continuità operativa degli interventi di riuso, soprattutto nei contesti rurali segnati da fragilità istituzionale (Eixerés Ros, 2025).

Lo spopolamento rurale costituisce una delle dinamiche strutturali più persistenti che interessano i territori interni dell'Europa meridionale; più che una fluttuazione demografica temporanea, esso segnala una riconfigurazione territoriale di lungo periodo, nella quale il progressivo invecchiamento della popolazione si intreccia con la contrazione dei servizi essenziali, la scarsa diversificazione economica e la riduzione della capacità di presidio da parte delle Istituzioni (ESPON, 2017; Pinilla and Sáez, 2017, 2021; Pla-Bañuls and Esparcia, 2024). Tale dinamica è stata documentata anche nei piccoli centri storici interessati da abbandono e fragilità infrastrutturale dove il Patrimonio edilizio resta esposto a progressivo degrado in assenza di strategie territoriali integrate (Sorbo et alii, 2025; Carocci et alii, 2023; Campisi, 2020).

All'interno di questo quadro strutturale gli indicatori demografici quantitativi consentono di comprendere più chiaramente l'entità della fragilità territoriale. Nel caso di Moya i dati ufficiali dell'Instituto Nacional de Estadística spagnolo (INE, n.d.) indicano un calo della popolazione da 453 abitanti nel 1981 a 133 nel 2025, pari a una riduzione superiore al 70% in quattro decenni. Con una superficie comunale di 91,73 km^2 la densità abitativa attuale si attesta intorno a 1,45 abitanti per km^2, valore nettamente inferiore sia alla media provinciale che a quella nazionale (Fig. 3). La struttura demografica interna accentua ulteriormente tale condizione: il 38,3% dei residenti ha 65 anni o più e solo il 4,5% ha meno di 18 anni. Questo squilibrio demografico limita il ricambio occupazionale, la sostenibilità dei servizi e la possibilità endogena di sviluppare impresa: tali indicatori collocano Moya tra i casi estremi di contrazione demografica nella Spagna interna.

In questi contesti il Patrimonio edilizio resta spesso una delle poche risorse capaci di generare attività economica e centralità simbolica, soprat-


Population by Municipality
100 or fewer inhabitants
Between 101 and 500 inhabitants
Between 501 and 1000 inhabitants
Between 1001 and 5000 inhabitants
Between 5001 and 20000 inhabitants
More than 20000 inhabitants
0
100
200 km


Madrid
Moya
Teruel
Cuenca
Valencia
Albacete

Previous page

Figg. 1, 2 | Territorial location of Moya (Spain) in relation to nearby provincial capitals and schematic representation of proximity ranges illustrating intermediate-distance accessibility conditions (credits: the Authors, 2026).

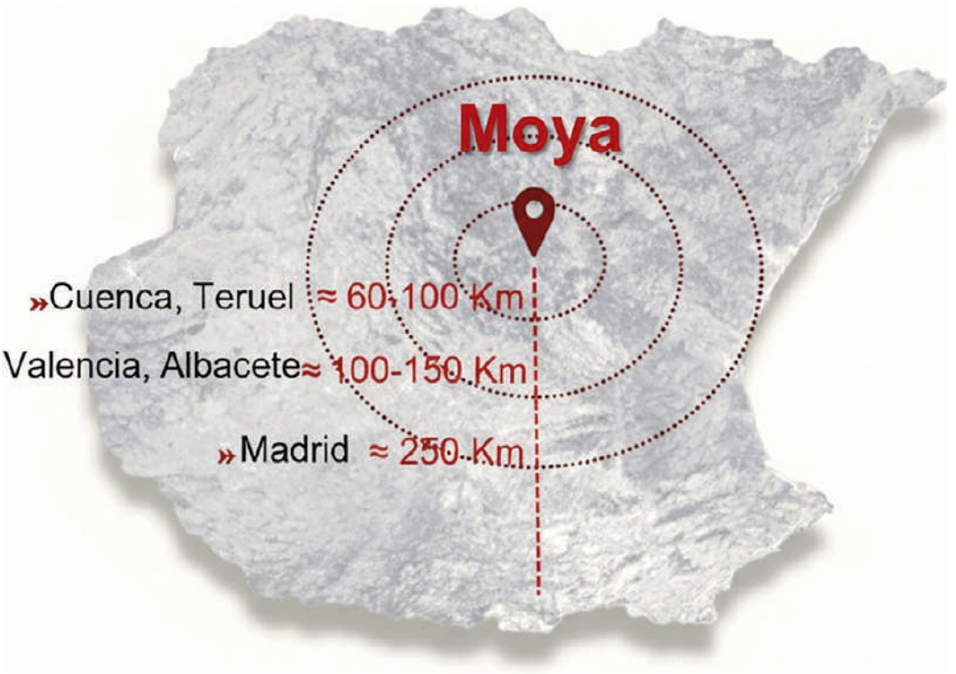


Fig. 3 | Population density by province in Spain, highlighting the structural demographic sparsity of inland territories such as Cuenca (source: INE; adapted by the Authors).

tutto quando è connesso al turismo culturale e a strategie di sviluppo locale (Ivona et alii, 2021). Studi internazionali indicano che il riuso di edifici storici abbandonati raramente produce un'inversione strutturale dei trend demografici o economici quando è attuato in assenza di strategie territoriali più ampie (Ivona et alii, 2021; Carocci et alii, 2023; Ajò, 2020). Per consentire un confronto strutturato la Tabella 1 sintetizza casi internazionali rappresentativi in base ai loro modelli di governance, approcci funzionali e risultati territoriali. La lettura comparativa delle esperienze internazionali mostra che il riuso adattivo opera attraverso configurazioni gestionali e funzionali differenziate: le iniziative culturali di iniziativa privata favoriscono l'attivazione ma presentano spesso una limitata stabilità nel tempo, mentre la governance pubblica garantisce maggiore continuità istituzionale ma resta dipendente dalla capacità di attrarre domanda esterna. All'interno di questa variabilità il caso di Moya rappresenta un esempio di sistema produttivo nel quale la concessione amministrativa pluriennale, la continuità gestionale e gli obblighi di manutenzione affidati al concessionario agiscono come condizioni abilitanti per un esito socioeconomico misurabile.

Valutare il riuso adattivo negli insediamenti rurali soggetti a spopolamento richiede pertanto di andare oltre gli aspetti architettonici ed esaminare gli effetti misurabili a scala insediativa, in condizioni di estrema contrazione e rarefazione demografica e territoriale. Dati demografici diacronici, flussi di visitatori in rapporto alla popolazione residente, stabilità della governance e continuità gestionale sono raramente analizzati all'interno di un quadro integrato e replicabile. Questo vuoto metodologico limita l'analisi comparativa e riduce la capacità di stabilire se il riuso adattivo transiti effettivamente da pratica conservativa a infrastruttura territoriale.

La maggior parte degli approcci esistenti rimane tuttavia focalizzata su strategie progettuali, narrazioni politiche o valutazioni qualitative, con uno sviluppo limitato di quadri di valutazione e basati su indicatori in grado di valutare le prestazioni post-intervento a livello insediativo, lacuna che giustifica la necessità di un modello di valutazione misurabile e replicabile.

Governance e valutazione alla scala insediativa | Il recupero dell'ex Chiesa della Trinidad è stato promosso dalla Diputación Provincial de Cuenca nell'ambito del Plan de Mejora de Infraestructuras Turísticas de la Provincia de Cuenca (Diputación Provincial de Cuenca, n.d.), con un investimento pubblico di 572.000 euro. L'intervento ha convertito un Bene in rovina in una struttura di ospitalità turistica all'interno del complesso storico fortificato. A intervento concluso la gestione è stata affidata, mediante una concessione di quattordici anni, a un operatore locale: la proprietà resta pubblica, mentre gestione, manutenzione e rischio economico sono assunti dal concessionario. Questo modello garantisce continuità d'uso oltre la fase di recupero del Bene e riduce il rischio di abbandono post-intervento, una criticità frequentemente riscontrata in interventi simili quando i modelli gestionali non sono chiaramente definiti (Saleh and Ost, 2023, 2024).

La struttura ricettiva funziona come unità di ospitalità autonoma, senza integrazione in una rete regionale, e l'attività resta fortemente stagionale in relazione alla concentrazione temporale dei flussi turistici, alla ridotta domanda nei mesi invernali e alla limitata capacità del contesto locale di ospitare utenti con continuità. Sebbene il modello concessorio sia un presupposto importante per la continuità gestionale l'impatto territoriale di lungo periodo dipende dalla concomitanza dei tre fattori di accessibilità, capacità di governance e flussi di visitatori. Il riuso della Trinidad rappresenta dunque un passaggio da una logica di conservazione a una logica infrastrutturale: il suo contributo alla resilienza territoriale deve essere valutato attraverso indicatori misurabili alla scala insediativa, capaci di cogliere non soltanto la capacità di produrre reddito ma anche un valore culturale e territoriale più ampio (Throsby, 2019). A tale fine lo studio adotta una metodologia strutturata entro un quadro di articolazione territoriale: Moya è stata selezionata in quanto insediamento fortificato a densità estremamente bassa, interessato da invecchiamento demografico e riduzione dei servizi ma al tempo stesso oggetto di diversi investimenti pubblici per il recupero del Patrimonio edilizio. Questa duplice condizione – fragilità territoriale e riuso già attuato – consente di valutare le prestazioni post-intervento più che l'intenzione progettuale; l'analisi si sposta pertanto da una conservazione centrata sull'oggetto a una valutazione infrastrutturale a scala insediativa.

La valutazione proposta è strutturata attraverso un sistema di indicatori su quattro dimensioni volto a cogliere prestazione socio-territoriale, configurazione di governance e gestione, contesto delle politiche e dei finanziamenti e strategia di intervento (Fig. 4). All'interno di queste macro-dimensioni, specifici indicatori riguardano modelli di investimento pubblico, modelli di governance basati sulla concessione, generazione di occupazione, continuità gestionale e strategie di adattamento architettonico.

Le quattro dimensioni integrano intensità gestionale, stabilità della governance, proporzionalità territoriale e strategia di intervento in un'unica struttura analitica che valuta: il tipo di riuso e la sua capacità di generare cicli regolari di attività; l'intensità d'uso annuale, misurata attraverso pernottamenti-camera e tasso di occupazione; il rapporto su base annua tra flussi di visitatori e popolazione residente; la configurazione di governance e intervento, comprendente il modello gestionale, la durata del contratto, gli obblighi manutentivi e la strategia di intervento architettonico. Per garantire la replicabilità metodologica il quadro di valutazione è restituito attraverso un protocollo standardizzato che prevede variabili misurabili, metodi di calcolo, fonti per l'acquisizione di dati, limiti e condizioni di trasferibilità (Tab. 2).

Il quadro degli indicatori si fonda esclusivamente su fonti verificabili e pubblicamente accessibili, tra cui dati statistici ufficiali, la documentazione contrattuale della concessione, la documentazione tecnica di progetto, le comunicazioni istituzionali e l'os-

Case	Context	Reuse model	Governance	Observed outcomes	Limitations	Replicability conditions
Bussana Vecchia (Italy)	Abandoned historic village	Informal cultural reoccupation by artistic communities	Self-organised community, non-institutional	Cultural activation; international visibility; identity reconstruction	Legal uncertainty; lack of infrastructure; fragile governance continuity	Dependent on spontaneous community formation and tolerance of informal governance
Belchite (Spain)	War-damaged historic settlement	Heritage interpretation and memorial tourism	Public management	Symbolic value; tourism attraction; cultural dissemination	Limited productive impact; absence of permanent activity; dependence on public funding	Requires strong institutional control and stable public funding
Castelvecchio Calvisio (Italy)	Inland historic rural settlement, seismic vulnerability and abandonment	Conservation-led strategies and methodological proposals for reuse	Public institutional frameworks	Development of analytical and conservation methodologies; improved knowledge of building fabric	Lack of implemented productive model; limited evidence of socio-economic activation	Applicable in research-oriented contexts with institutional support
Umbralejo, Granadilla and Búbal (Spain)	Abandoned rural settlements (depopulation)	Educational reuse (state-led programmes)	Public institutional management	Periodic occupation; heritage maintenance; educational activation	No permanent population; limited economic autonomy; discontinuous use	Requires sustained public programmes and long-term institutional management
Moya (Spain)	Inland fortified settlement, extreme depopulation	Adaptive reuse as rural accommodation within a heritage system	Public ownership with concession-based management	Seasonal visitor flows exceeding the resident population, employment generation, and operational continuity	Strong seasonality; limited local economic base; dependence on territorial integration	Requires public ownership, concession-based governance, sufficient demand, and territorial integration

Tab. 1 | Comparative international cases of heritage reuse in depopulating or fragile contexts (credit: the Authors, 2026).

servazione diretta, che assicurano la trasparenza metodologica e facilitano la replicabilità in insediamenti rurali analoghi. I criteri di calcolo sono standardizzati per consentire la confrontabilità tra i casi: l'intensità socio-territoriale è ricostruita a partire dai pernottamenti-camera disponibili e occupati e dal rapporto tra visitatori stimati e popolazione residente; la continuità gestionale e operativa è valutata attraverso la documentazione contrattuale della concessione, la durata dell'affidamento e gli obblighi manutentivi; la valutazione costruttiva deriva dalla documentazione di progetto e dalla normativa sul Patrimonio.

Lo studio riconosce la presenza di diversi limiti: i dati di occupazione si basano sulle stime disponibili e non su serie storiche complete; la scala dell'intervento è limitata a una sola struttura ricettiva; la resilienza demografica non può essere valutata tramite variazioni di breve periodo, ma richiede osservazioni temporali estese. Tali vincoli sono esplicitamente considerati nell'interpretazione dei risultati, tuttavia entro questi limiti metodologici il quadro proposto su quattro dimensioni consente una valutazione strutturata del passaggio dal recupero architettonico a un'effettiva infrastruttura territoriale.

Riuso adattivo e gestione della Trinidad nel sistema fortificato di Moya | Il quadro di valutazione a quattro indicatori è applicato al riuso adattivo dell'ex Chiesa della Trinidad all'interno dell'insediamento fortificato di Moya (Cuenca, Spagna), un complesso medievale cinto da mura che ospita un'elevata concentrazione di strutture religiose, civili e difensive (Fig. 5). L'insediamento è tutelato come Bien de Interés Cultural (BIC) nella categoria Conjunto Histórico (BOE, 1982), classificazione che stabilisce la protezione giuridica del complesso e subordina tutti gli interventi al rispetto delle normative vigenti e alla supervisione archeologica. L'intervento ha convertito l'ex edificio ecclesiastico in una struttura ricettiva rurale con 11 camere, formalmente classificata come Singular Rural Accommodation ai sensi del Decreto Regionale 96/2003 che disciplina il turismo rurale in Castilla-La Mancha. Tale classificazione integra l'edificio in un quadro ricettivo giuridicamente riconosciuto, assicurandone la conformità agli standard regionali in materia di sicurezza, abitabilità e servizi.

La domanda turistica nella provincia è caratterizzata da una forte variazione stagionale, con picchi nei mesi estivi e livelli di attività significativamente più bassi in inverno (Fig. 6). Con 11 camere e circa 133 giorni di operatività annua, l'ospitalità complessiva è di 1.463 pernottamenti-camera, mentre l'occupazione effettiva varia tra 366 e 512 pernottamenti-camera, pari a un tasso di occupazione compreso tra il 25% e il 35%. Assumendo due persone per camera-notte, gli utenti annui stimati variano tra 732 e 1.024. In relazione ai 133 residenti il rapporto tra flusso di visitatori e popolazione residente varia tra 5,5 e 7,7, evidenziando un'elevata presenza esterna nonostante la marcata stagionalità. Tale flusso turistico è in parte spiegato dalla presenza di diversi siti culturali e attrattori naturali a breve distanza dal complesso fortificato (Fig. 7).

La gestione opera attraverso una concessione pubblica pluriennale assegnata tramite procedura negoziata, che trasferisce al concessionario la manutenzione e le responsabilità operative, contribuendo a evitare forme di abbandono successive all'intervento. L'attività genera due / tre posizioni di lavoro stagionali e produce ricadute indirette sull'economia locale, in particolare attraverso la domanda di beni e servizi legati all'ospitalità. Sebbene il modello concessorio assicuri la continuità della presenza delle Istituzioni locali la produttività della struttura resta fortemente dipendente dalla stagionalità della domanda e dalla ridotta concorrenza di mercato tipica dei territori a densità estremamente bassa.

Prima dell'intervento l'ex Chiesa della Trinidad versava in uno stato avanzato di rovina, priva di copertura, danni agli elementi strutturali e un significativo degrado delle superfici murarie (Fig. 8). Il recupero ha previsto interventi di scavo archeologico, consolidamento della muratura esistente, ricostruzione parziale e una nuova copertura, garantendo la leggibilità del rapporto tra il palinsesto murario conservato e l'addizione contemporanea. La documentazione progettuale dei prospetti, delle sezioni e delle planimetrie, che evidenzia la relazione tra murature conservate e nuovi elementi strutturali, è presentata nelle Figure 9, 10 e 11, che chiariscono il rapporto tecnico tra l'involucro storico e l'intervento contemporaneo: l'inserimento di una nuova copertura e di un organismo interno strutturalmente indipendente, secondo una logica di tipo 'scatola nella scatola', ha consentito l'adeguamento funzionale dell'edificio preservando al contempo l'involucro storico. La nuova configurazione interna e l'impianto ricettivo sono documentati nelle Figure 12 e 13, che illustrano il riuso adattivo dell'ex rudere in una struttura ricettiva. I successivi interventi sul Patrimonio all'interno del complesso fortificato attestano la continuità dell'impegno delle istituzioni locali; tuttavia non è possibile stabilire un nesso causale diretto tra il riuso a fini ricettivi e i successivi investimenti pubblici.

Coordinamento sistemico, sinergie e limiti strutturali | L'applicazione del quadro di valutazione articolato in quattro indicatori restituisce un profilo prestazionale differenziato. Il riuso adattivo della Trinidad configura la riattivazione funzionale di un Bene all'interno del sistema economico locale, reinserendo una struttura abbandonata in un regime d'uso regolamentato e generando occupazione stagionale e flussi di visitatori superiori alla popolazione residente (Ivona et alii, 2021; Carocci et alii, 2023). La sua efficacia territoriale resta tuttavia condizionata dalla scala della governance, dall'integrazione in reti più ampie di accessibilità, ospitalità e valorizzazione culturale, nonché dalla continuità della domanda turistico-ricettiva.

Questi risultati possono essere interpretati in relazione ad altre esperienze europee di rigenerazione guidata dal Patrimonio in insediamenti abbandonati o in spopolamento. Casi come Bussana Vecchia (Bogliolo, 2019) mostrano che iniziative culturali e comunità artistiche possano riattivare tessuti storici abbandonati, mentre progetti che valorizzano Beni in rovina, come quello di Belchite in Spagna

Indicator	Definition	Calculation method	Unit	Data source	Limitations	Transferability
Operational intensity (room-nights)	Absolute level of annual use of the accommodation asset	RN = R × D × α	room-nights / year	Capacity data; opening calendar; occupancy records; official statistics	Depends on the reliability and availability of occupancy and operational data	Applicable to accommodation-based reuse with defined capacity and operational period
Occupancy rate	Degree of use relative to available capacity	OR = [RN / (R × D)] × 100	%	Occupancy records; capacity data; official statistics	Sensitive to data aggregation; may mask seasonal fluctuations	Widely applicable across tourism and adaptive reuse contexts
Visitor flow ratio	Proportional impact of users relative to resident population	VFR = (RN × β) / P	Ratio (n:1)	Municipal census data; accommodation capacity; estimated occupancy	Based on estimated users;excludes non-accommodated visitors	Particularly relevant in low-density or depopulating territories
Governance stability	Capacity of the management model to ensure continuity over time	Contract duration + compliance assessment	Years / ordinal scale	Administrative contracts; public procurement documents; institutional records	Context-dependent; assessment varies across institutional frameworks	Applicable to concession-based or public–private governance models
Constructive compatibility (legibility)	Degree of differentiation and reversibility between the intervention and the heritage fabric	Expert-based assessment of intervention strategy	Ordinal scale	Technical project documentation; heritage regulations; on-site observation	Subject to interpretative variability and regulatory context	Transferable to heritage interventions involving insertion or reconstruction strategies

Legend: R = number of rooms; D = operational days per year; α = occupancy rate (0–1); β = users per room; P = resident population; RN = room-nights; OR = occupancy rate (%); VFR = visitor flow ratio.

Tab. 2 | Indicator Framework for Evaluating Adaptive Reuse at Settlement Scale (credit: the Authors, 2026).

(Alfaro Rodríguez et alii, 2016), dimostrano che è possibile generare valore simbolico ed economico senza la ricostruzione integrale di un manufatto. Altre ricerche hanno esplorato invece strategie orientate alla ricostruzione per consentire il riuso di insediamenti medievali parzialmente in rovina (Musso and Franco, 2025).

Rispetto a tali esperienze il caso di Moya mette in evidenza il ruolo decisivo della presenza stabile delle Istituzioni e della continuità gestionale nel garantire che il riuso del Patrimonio funzioni come componente operativa di sistemi territoriali capaci di generare attività socioeconomiche misurabili (Saleh and Ost, 2023).

Dal punto di vista della governance il contratto di concessione trasferisce il Bene da una condizione di conservazione statica a un regime d'uso produttivo ma regolamentato, collegando gli obblighi manutentivi allo svolgimento dell'attività economica. L'edificio passa così dalla condizione di rudere consolidato a quella di struttura attiva, il cui funzionamento è sostenuto, almeno in parte, dai ricavi della gestione.

Analizzato alla scala dell'intero insediamento fortificato l'intervento non può essere inteso come episodio isolato, in quanto fa parte di una più ampia sequenza di interventi pubblici sul Patrimonio, inseriti in una rete provinciale di itinerari culturali e paesaggistici (Fig. 14), che comprende l'adattamento della Chiesa di San Bartolomé a Centro di Accoglienza Visitatori, il riuso dell'ex Convento delle Concepcionistas come spazio polifunzionale e il consolidamento delle strutture difensive. Questi processi, già inquadrati entro strategie integrate di rigenerazione territoriale per il sito (Barelles-Vicente et alii, 2025), riflettono la presenza continua delle Istituzioni e il recupero sistemico del Patrimonio culturale.

Tuttavia i soli investimenti economici non garantiscono di per sé una trasformazione strutturale del contesto territoriale: l'effetto moltiplicatore di questi interventi dipende infatti dal loro inserimento in itinerari di valorizzazione del Patrimonio capaci di connettere insediamenti e siti culturali limitrofi (Fig. 15). In questa prospettiva il coordinamento tra ospitalità, attrezzature e itinerari culturali e programmazione di eventi attrattivi risulta decisivo per prolungare la permanenza dei visitatori, diversificarne i profili e consolidare l'occupazione. Il nodo decisivo non risiede quindi nel numero degli edifici recuperati ma nella loro capacità di operare come componenti di un sistema territoriale integrato, come evidenziano gli approcci territoriali basati sulle reti, secondo i quali l'efficacia del riuso del Patrimonio dipende non solo dai singoli interventi ma anche dalla loro integrazione in sistemi coordinati di mobilità, ospitalità e programmazione culturale (Cimadomo, Lecardane and Torregrossa, 2025).

In questo senso il riuso adattivo può costituire una condizione abilitante necessaria per la sostenibilità economica del Patrimonio. In contrasto con un modello di 'museo all'aperto', in cui la conservazione genera spesa pubblica ricorrente senza un ritorno economico diretto, l'introduzione di usi produttivi consente che la manutenzione e la tutela siano parzialmente sostenute dal reddito generato dal Bene stesso, principio sempre più enfatizzato negli studi recenti sui modelli circolari e autosostenibili di riuso del Patrimonio (Foster, 2020; Saleh and Ost, 2024). La conservazione del Patrimonio viene così collegata alla sostenibilità gestionale, anziché alla sola erogazione continuativa di sussidi.

La capacità trasformativa di questo modello resta tuttavia condizionata da vincoli strutturali, quali la stagionalità climatica, la debolezza della base imprenditoriale locale e la bassissima densità demografica. La procedura negoziata di affidamento in concessione e la ridotta concorrenza di mercato osservata riflettono la moderata attrattività dei territori rurali interni per investimenti privati. Anche se la presenza dell'Istituzione locale è assicurata le prospettive di crescita nel lungo periodo dipendono dal consolidamento di una rete territoriale più ampia, in grado di rafforzare la domanda, migliorare l'accessibilità e attenuare la volatilità stagionale.

Contributo agli SDG, sinergie e condizioni di governance | L'intervento esposto offre un contributo differenziato agli Obiettivi di Sviluppo Sostenibile. I contributi diretti riguardano gli SDG 9 e 10, poiché il riuso adattivo si configura come una forma di innovazione infrastrutturale che prolunga il ciclo di vita del Patrimonio e integra nuove funzioni produttive all'interno delle strutture esistenti, compresi i sistemi di governance e gestione. Il riuso adattivo di un insediamento rurale marginale contribuisce al riequilibrio territoriale reintroducendo attività e flussi dall'esterno, anche se la sua efficacia dipende dal consolidamento delle strutture economiche locali e dall'integrazione territoriale di lungo periodo.

Gli impatti indiretti possono essere identificati in relazione agli SDG 8 e 11 per la generazione di occupazione locale, tutela del Patrimonio e resilienza degli insediamenti, mentre potenziali compromessi possono emergere in relazione agli SDG 12, 13, 15 e 16, soprattutto quando il riuso dipende dal turismo stagionale o dalla domanda esterna. Queste dinamiche evidenziano il ruolo centrale delle condizioni di governance poiché la sostenibilità del riuso adattivo dipende dal coordinamento multilivello, dalla diversificazione delle attività economiche e dall'integrazione in reti territoriali più ampie: in assenza di tali condizioni l'intervento rischia di restare esposto alla dipendenza da flussi esterni, alla fragilità dell'occupazione generata e alla limitata capacità del contesto locale di trattenere valore.

In tale ottica il principale contributo di questo studio consiste nel mostrare, attraverso indicatori misurabili e verificabili, che il riuso adattivo può operare al tempo stesso come strategia di conservazione del Patrimonio e come infrastruttura economica. Il suo valore non si esaurisce nel recupero fisico dell'edificio ma risiede nella capacità di sostenere attività produttive e di contribuire alla sostenibilità economico-finanziaria dei Beni tutelati in contesti caratterizzati da una densità insediativa estremamente bassa.

Conclusioni | Questo studio ha esaminato il riuso adattivo dell'ex Chiesa della Trinidad a Moya attraverso un quadro a quattro dimensioni a scala insediativa, concepito per valutare gli interventi realizzati sul Patrimonio come infrastrutture territoriali

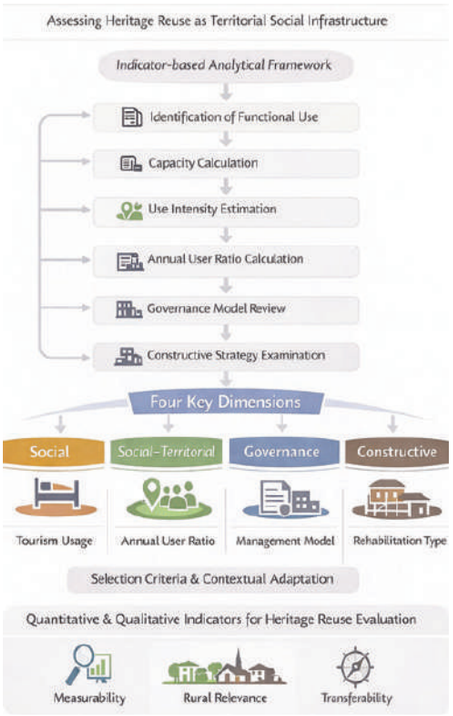


Fig. 4 | Settlement-scale evaluation framework based on four analytical dimensions: social activation, operational intensity, visitor flow ratio, and governance-constructive configuration (credit: the Authors, 2026).

socioeconomiche. Andando oltre una valutazione puramente conservativa del manufatto architettonico lo studio inquadra il riuso adattivo come condizione territoriale valutabile che collega dimensioni costruttive, operative e di governance. I risultati dimostrano che il riuso adattivo può operare come infrastruttura produttiva regolamentata, trasformando i Beni tutelati in componenti attivi del sistema economico locale; tuttavia tali risultati non sono garantiti dal solo intervento architettonico e dipendono dalla stabilità della governance, dalla continuità della domanda e dalla gestione operativa. Al tempo stesso i risultati confermano che il solo recupero architettonico non è sufficiente a produrre una trasformazione territoriale di carattere strutturale. L'impatto della rigenerazione innescata dal Patrimonio resta infatti condizionato dal coordinamento di diverse funzioni, dai modelli di accessibilità, dalla programmazione delle attività e dall'integrazione entro reti territoriali più ampie. In questa prospettiva il riuso adattivo emerge come condizione necessaria, ma non sufficiente, per sostenere nel lungo periodo la resilienza demografica ed economica dei contesti rurali a densità estremamente bassa.

Il contributo principale dello studio risiede nella formulazione di un quadro valutativo basato su indicatori; tuttavia la sua applicabilità rimane condizionata dalla disponibilità dei dati, dalla validazione su singolo caso e dall'assenza di una valutazione longitudinale. In relazione agli SDG il riuso adattivo può contribuire sia alla conservazione del Patrimonio sia allo sviluppo territoriale, anche se la sua efficacia dipende dalla continuità della presenza istituzionale, dalla stabilità della domanda e dall'integrazione territoriale. In definitiva lo studio sostiene che la sostenibilità del Patrimonio rurale non può fare affidamento esclusivamente sulle politiche di conservazione: è necessario trasformare i Beni in sistemi operativi capaci di generare attività e di sostenere la manutenzione attraverso l'uso; quando è strutturato attraverso una logica di governance e infrastrutturazione misurabile il riuso adattivo costituisce una via praticabile verso tale integrazione.

Across Europe, numerous marginal rural settlements characterised by demographic decline and reduced access to services are marked by the presence of abandoned historic fabrics (Bizzarri and Micera, 2021; Lak, Gheitasi and Timothy, 2020). In many cases, these sites have been preserved as consolidated ruins, protected under heritage legislation and maintained as cultural testimonies of past settlement structures (Plevoets and Van Cleempoel, 2019; Arfa et alii, 2022). While this approach ensures material conservation, it often fails to generate sustained socio-economic activation or to counteract structural territorial inequalities.

Recent debates have therefore moved towards systemic and data-informed approaches capable of mapping regeneration processes and evaluating their impacts beyond the single-object scale, particularly in inland areas and small fortified settlements (Brignoni et alii, 2023). In parallel, a growing body of work links rural regeneration to governance models and SDG-oriented frameworks, stressing the need to connect spatial strategies with operational continuity and socio-economic implications (Eixerés Ros, 2025). Within this broader transition agenda, cultural heritage is increasingly framed not only as a value to be safeguarded, but as a potential lever within integrated policy frameworks addressing ecological transition, territorial cohesion and long-term sustainability (Casanovas, Alonso Campanero and Campisi, 2024; Foster, 2020).

Over the last two decades, adaptive reuse has emerged as a strategic alternative to purely conservative practices (Mısırlısoy and Günçe, 2016; Pintossi et alii, 2023), reframing heritage buildings as potential drivers of regeneration. However, post-implementation performance at settlement scale remains underexplored, particularly in rural contexts (Augustiniok et alii, 2025). Comparatively little attention has been devoted to such performance in small rural settlements, where continuity of use, governance arrangements and the measurable territorial impact of reuse interventions determine long-term effectiveness. Analytical frameworks for evaluating implemented reuse at settlement scale remain limited, particularly in extremely low-density territories where proportional effects differ from those in larger urban models. The present study relies on verifiable sources, including public statistics, contractual documentation and project records, thereby ensuring methodological transparency and replicability.

The paper develops and tests a settlement-scale indicator-based evaluation framework through the case of the fortified settlement of Moya (Spain). As illustrated in Figures 1 and 2, its geographical position, located at an intermediate distance from several provincial capitals and nearby cultural assets, constitutes a structural variable influencing the viability and scalability of heritage-led socio-economic activation processes. The study is guided by four interrelated research objectives concerning: the construction of measurable settlement-scale indicators capable of capturing social, territorial, governance, and intervention dimensions; the assessment of socio-territorial performance after the operational reactivation of reconstructed heritage buildings; the identification of governance and management conditions ensuring long-term continuity beyond initial public investment; and the evaluation of transferability to other depopulating rural settlements characterised by structural demographic fragility.

The originality of the contribution lies in shifting the analytical focus from design intention to operational performance, articulating a replicable evaluation model for measuring infrastructural impact after implementation. The article is structured as follows: it first frames adaptive reuse within the broader debate on territorial infrastructure and rural fragility; it then defines the governance conditions and indicator system underpinning the methodological approach; subsequently, it applies the framework to the Moya case; finally, it discusses systemic coordination, structural barriers, replicability conditions and the contribution of the study to Sustainable Development Goals (SDGs) 9 and 10.

State of the art: adaptive reuse as territorial infrastructure | Over the last two decades, adaptive reuse has progressively shifted from a conservation-centred paradigm focused on material preservation towards broader territorial and socio-economic perspectives. Early contributions evaluated interventions through authenticity, structural consolidation, and typological compatibility, treating heritage buildings as discrete architectural artefacts. More recent research frames heritage reuse within broader territorial regeneration strategies linking cultural assets, environmental transition, and local development (Toscano, 2023; Baiani et alii, 2024; Fiorini et alii, 2025).

More recent scholarship and European policy frameworks increasingly conceptualise heritage as a territorial resource embedded within socio-economic systems, while also highlighting ongoing conceptual debates regarding the transformation, relocation, or reinterpretation of historic structures within contemporary adaptive reuse practices (Tao, Chen and Aoki, 2025). Initiatives such as the European Union's Horizon Europe programme and the Council of Europe Framework Convention on the Value of Cultural Heritage for Society (Council of Europe, 2005) emphasise heritage as a driver of cohesion, inclusion, and local development (UNESCO, 2023; Hussein and Alhebsi, 2025). Within this perspective, adaptive reuse is no longer understood solely as architectural rehabilitation but as a potential component of territorial infrastructure capable of generating employment, services and institutional continuity (Casanovas, Alonso Campanero and Campisi, 2024).

International experiences in rural regeneration illustrate both opportunities and constraints (Rudan, 2023; Proietti, 2024). In the Spanish context, state-led programmes such as PRUEPA have implemented educational reuse strategies in depopulated settlements including Umbralejo, Granadilla and Búbal, where periodic occupation and heritage activation are achieved through institutional management schemes (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, n.d.). In parallel, recent theoretical contributions have revisited the

principle of reversibility as a design strategy capable of reconciling conservation requirements with the introduction of new architectural additions in historic contexts (Fonti, 2024).

Coordinated heritage activation through accommodation, visitor infrastructure, and cultural programming can generate economic flows. Recent studies propose methodological frameworks for adaptive reuse in traditional and vernacular contexts (Khalil and Üzümcüoglu, 2025). Brignoni et alii (2023) propose a classification system based on temporality and community involvement to interpret design-driven regeneration in small fortified settlements such as Castelvecchio Calvisio (Fiorani, 2015), where methodological experimentation has contributed to advancing knowledge on seismic vulnerability and reuse strategies.

These experiences highlight the need for stable governance and territorial articulation. Architectural quality alone is insufficient; accessibility and spatial positioning shape long-term viability. In this regard, cooperative or concession-based management models have been identified as critical variables in ensuring long-term operation, particularly in rural contexts characterised by institutional fragility (Eixerés Ros, 2025).

Rural depopulation constitutes one of the most persistent structural dynamics affecting inland territories across Southern Europe. Rather than representing a temporary demographic fluctuation, it reflects a long-term territorial reconfiguration characterised by ageing populations, service withdrawal, reduced economic diversification, and weakened institutional presence (ESPON, 2017; Pinilla and Sáez, 2017; Pinilla and Sáez, 2021; Pla-Bañuls and Esparcia, 2024). Similar demographic contraction has been documented in small historic centres affected by abandonment and infrastructural fragility, where heritage assets remain exposed to progressive degradation in the absence of integrated territorial strategies (Sorbo et alii, 2025; Carocci et alii, 2023; Campisi, 2020).

Within this structural framework, quantitative demographic indicators provide a clearer understanding of the scale of territorial fragility. In the case of Moya, official data from the Spanish National Statistics Institute (INE, n.d.) indicate a population decline from 453 inhabitants in 1981 to 133 in 2025, representing a cumulative reduction of more than 70% over four decades. With a municipal area of 91.73 km^2, current population density

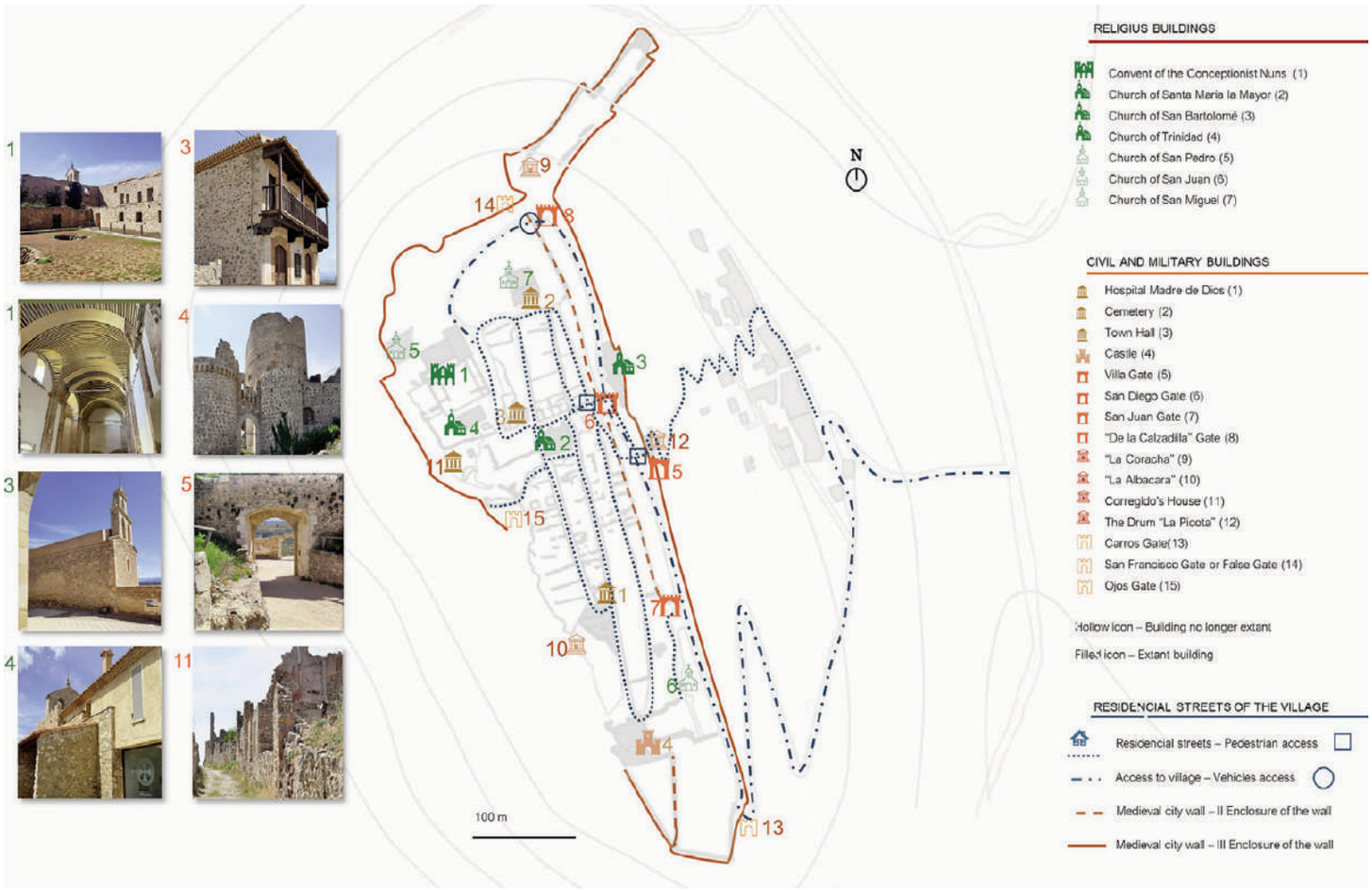


Fig. 5 | Heritage map of the fortified settlement of Moya showing the distribution of religious buildings, civil and military structures, and the medieval urban fabric within the historic walled enclosure (credit: the Authors, 2026).

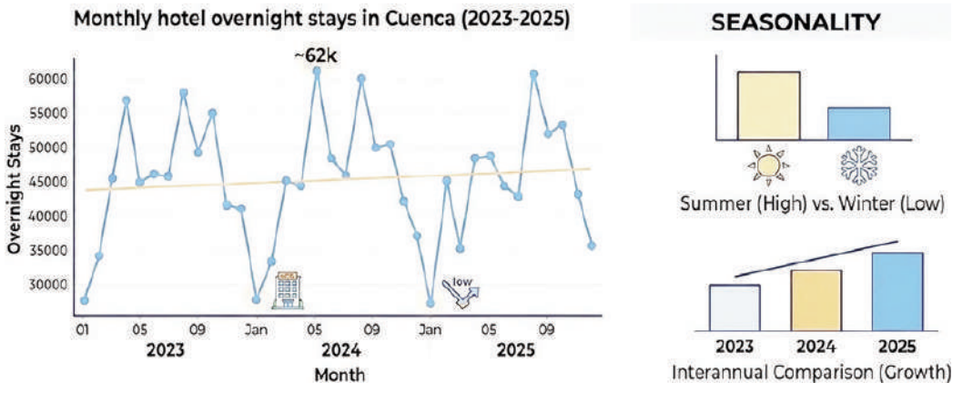


Fig. 6 | Monthly hotel overnight stays in the Province of Cuenca (2023-2025), illustrating seasonal tourism patterns and recent growth trends (source: INE, n.d.; adapted by the Authors).

stands at approximately 1.45 inhabitants per km^2, substantially below both provincial and national averages (Fig. 3). The internal demographic structure further accentuates this condition: 38.3% of residents are aged 65 or older, while only 4.5% are under 18 years of age. This demographic imbalance constrains labour renewal, service sustainability, and endogenous entrepreneurial capacity. These indicators position Moya as an extreme case of demographic contraction within inland Spain. In these contexts, heritage assets often remain one of the few structurally persistent resources capable of generating economic activity and symbolic centrality, particularly when linked to cultural tourism and local development strategies (Ivona et alii, 2021). International evidence indicates that the reuse of abandoned heritage buildings rarely produces structural demographic or economic reversal when implemented without broader territorial strategies (Ivona et alii, 2021; Carocci et alii, 2023; Ajò, 2020).

To enable a structured comparison, Table 1 synthesises representative international cases according to their governance models, functional approaches and territorial outcomes. Comparative analysis of international experiences shows that adaptive reuse operates through distinct governance and functional models. Informal cultural initiatives enable activation but lack stability, while public or institutional models ensure continuity but depend on external demand. Within this spectrum, the Moya case illustrates a regulated productive system where contractual stability and operational continuity act as enabling conditions for measurable socio-economic output.

Evaluating adaptive reuse in depopulating rural settlements therefore requires moving beyond architectural description and examining measurable settlement-scale effects under conditions of extreme demographic contraction and structural sparsity. Longitudinal demographic data, proportional visitor flows relative to resident population,

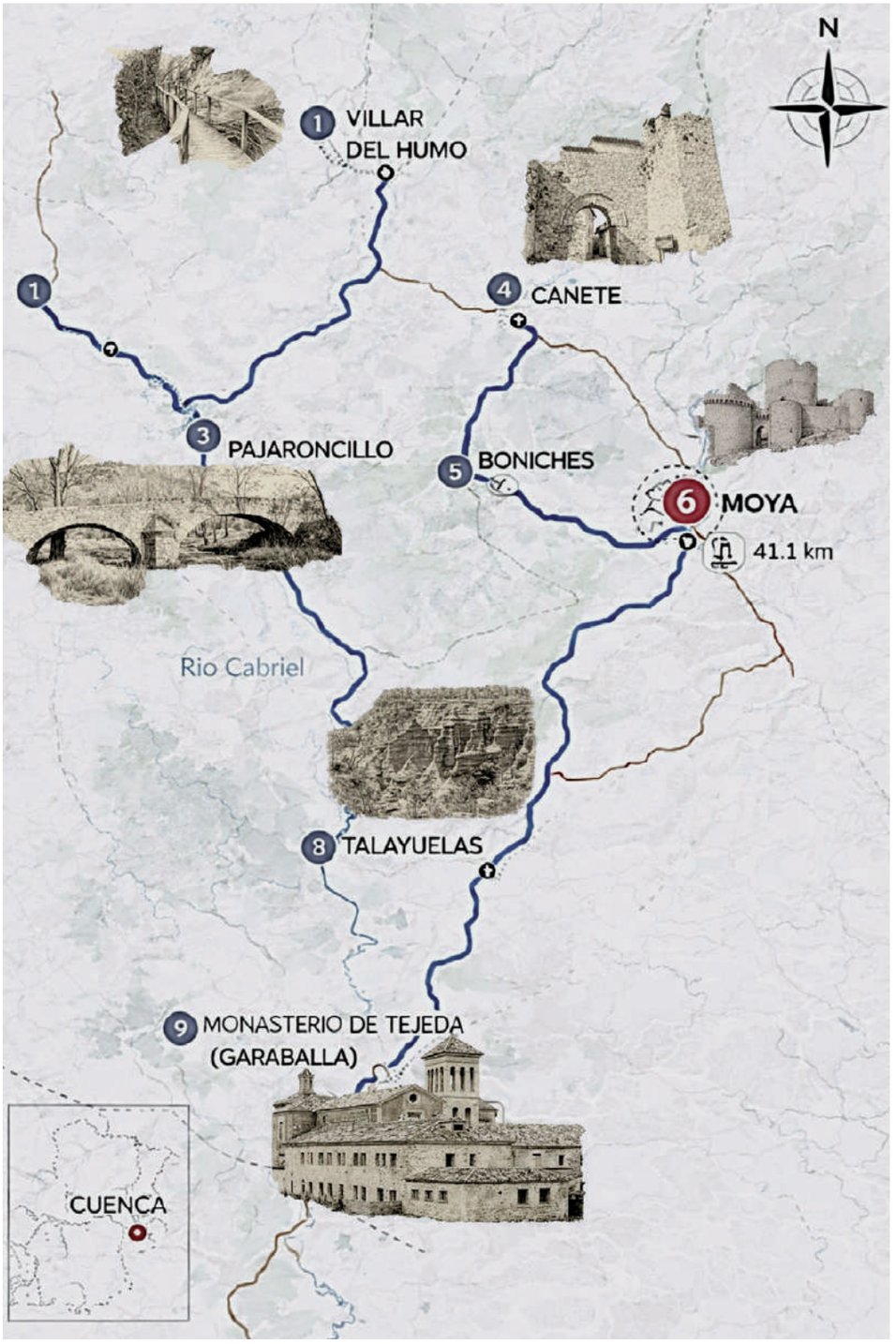


Fig. 7 | Territorial proximity of nearby settlements and heritage sites around Moya, indicating main cultural and landscape attractions within its local visitor catchment area (credit: the Authors, 2026).



Fig. 8 | Former Church of La Trinidad in Moya prior to intervention, documenting the deteriorated condition of the historic masonry fabric and the loss of the original roofing and structural elements (credit: the Authors, 2026).

governance stability, and continuity of use are seldom analysed within an integrated and replicable framework. This methodological gap limits comparative analysis and weakens the capacity to determine whether adaptive reuse effectively transitions from conservation practice to territorial infrastructure. However, most existing approaches remain focused on design strategies, policy narratives or qualitative assessments, with limited development of standardised, indicator-based frameworks capable of evaluating post-implementation performance at settlement scale. This gap justifies the need for a measurable and replicable evaluation model.

Governance and settlement-scale evaluation | The rehabilitation of the former Church of La Trinidad was promoted by the Provincial Council of Cuenca within the Provincial Tourism Infrastructure Improvement Plan (Diputación Provincial de Cuenca, n.d.), with a public investment of €572,000. The intervention converted a ruined heritage asset into regulated tourism accommodation within the fortified historic complex.

Following completion, management was delegated through a 14-year administrative concession to a locally based private operator. Ownership remains public, while management, maintenance, and economic risk are assumed by the concessionaire. This model ensures continuity of use beyond rehabilitation and reduces the risk of abandonment after the intervention, a challenge frequently identified in heritage reuse initiatives when operational business models are not clearly defined (Saleh and Ost, 2023, 2024).

The facility functions as a single accommodation unit, without integration into a coordinated regional network, and activity remains strongly seasonal due to climatic and demand constraints. While the concession model secures functional continuity, long-term territorial impact depends on broader articulation between accessibility, governance capacity, and visitor flows.

The conversion of La Trinidad thus represents a shift from conservation logic toward infrastructural logic. Its contribution to territorial resilience must be assessed through measurable settlement-scale indicators, capable of capturing not only economic performance but also broader cultural and territorial value (Throsby, 2019).

The study adopts a structured case-study methodology within a framework of territorial articulation. Moya was selected through purposive sampling as an extreme low-density fortified settlement affected by demographic ageing and service withdrawal, yet subject to sustained public investment in heritage rehabilitation. This dual condition, territorial fragility combined with implemented reuse, allows evaluation of post-intervention performance rather than design intention. The analysis therefore shifts from object-based conservation toward settlement-scale infrastructural evaluation.

The proposed evaluation is structured through a four-dimensional indicator system capturing socio-territorial performance, governance and management configuration, policy and funding context, and intervention strategy (Fig. 4). Within these macro-dimensions, specific indicators address public investment schemes, concession-based governance models, employment generation, long-term operation, and architectural adaptation strategies. The four dimensions integrate operational intensity, governance stability, territorial proportionality and intervention strategy within a single analytical structure. The framework assesses: type of implemented use and its capacity to generate regular activity cycles; annual intensity of use, measured through room-nights and occupancy rate; the visitor flow ratio, relating estimated annual users to resident population; and the governance and intervention configuration, including management model, contractual stability, maintenance obligations and architectural intervention strategy. To ensure methodological replicability, the evaluation framework is operationalised through a standardised protocol including measurable variables, calculation methods, data sources, limitations, and transferability conditions (Table 2).

The indicator framework relies exclusively on verifiable and publicly accessible sources, including official statistical data, contractual documentation relating to the administrative concession, technical project records, institutional communications, and direct observation. This documentary basis ensures methodological transparency and facilitates replication in comparable rural settlements. Calculation criteria are standardised to allow comparability across cases. Social-territorial intensity derives from available and occupied room-nights and proportional visitor flow; institutional stability derives from contractual documentation and employment structure; constructive assessment derives from project documentation and heritage regulations.

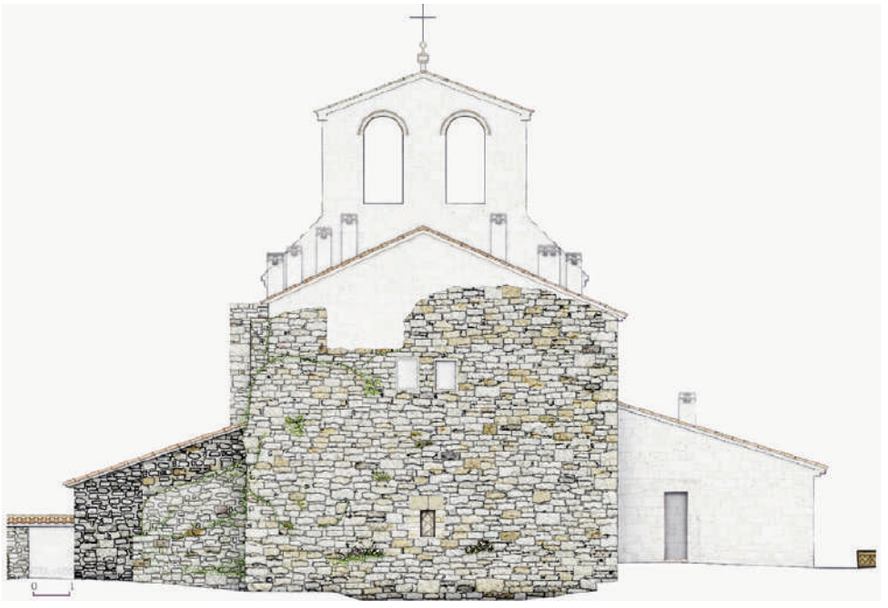
The study acknowledges several limitations. Operational occupancy data are based on available estimates rather than full longitudinal datasets; the scale of intervention is limited to a single accommodation facility; and demographic resilience cannot be evaluated through short-term variation but requires extended temporal observation. These constraints are explicitly considered in the interpretation of results. Within these methodological boundaries, the four-dimensional framework enables a structured assessment of whether implemented adaptive reuse transitions from architectural recovery to effective territorial infrastructure.

Adaptive reuse and management of La Trinidad within the fortified system of Moya | The four-indicator framework is applied to the adaptive reuse of the former Church of La Trinidad within the fortified settlement of Moya (Cuenca, Spain), a medieval walled complex containing a dense concentration of religious, civil and defensive heritage structures (Fig. 5). The settlement is protected as a Bien de Interés Cultural (BIC) under the Conjunto Histórico category (BOE, 1982), a designation that establishes statutory heritage protection for the ensemble and subjects all interventions to regulatory compliance and archaeological supervision.

The intervention converted the former ecclesiastical structure into an 11-room regulated rural accommodation facility, formally classified as Singular Rural Accommodation under Regional Decree 96/2003 regulating rural tourism in Castilla-La Mancha. This classification integrates the building into a legally recognised hospitality framework, ensuring compliance with regional standards regarding safety, habitability, and service provision.

Tourism demand in the province is characterised by strong seasonal variation, with peaks concentrated in summer months and significantly lower activity during winter (Fig. 6). With 11 rooms and







Figg. 9-11 | Architectural elevations (north, east, and west) of the reconstructed former Church of La Trinidad following its adaptive reuse as rural accommodation in the fortified settlement of Moya (credits: execution project documentation; adapted by the Authors).

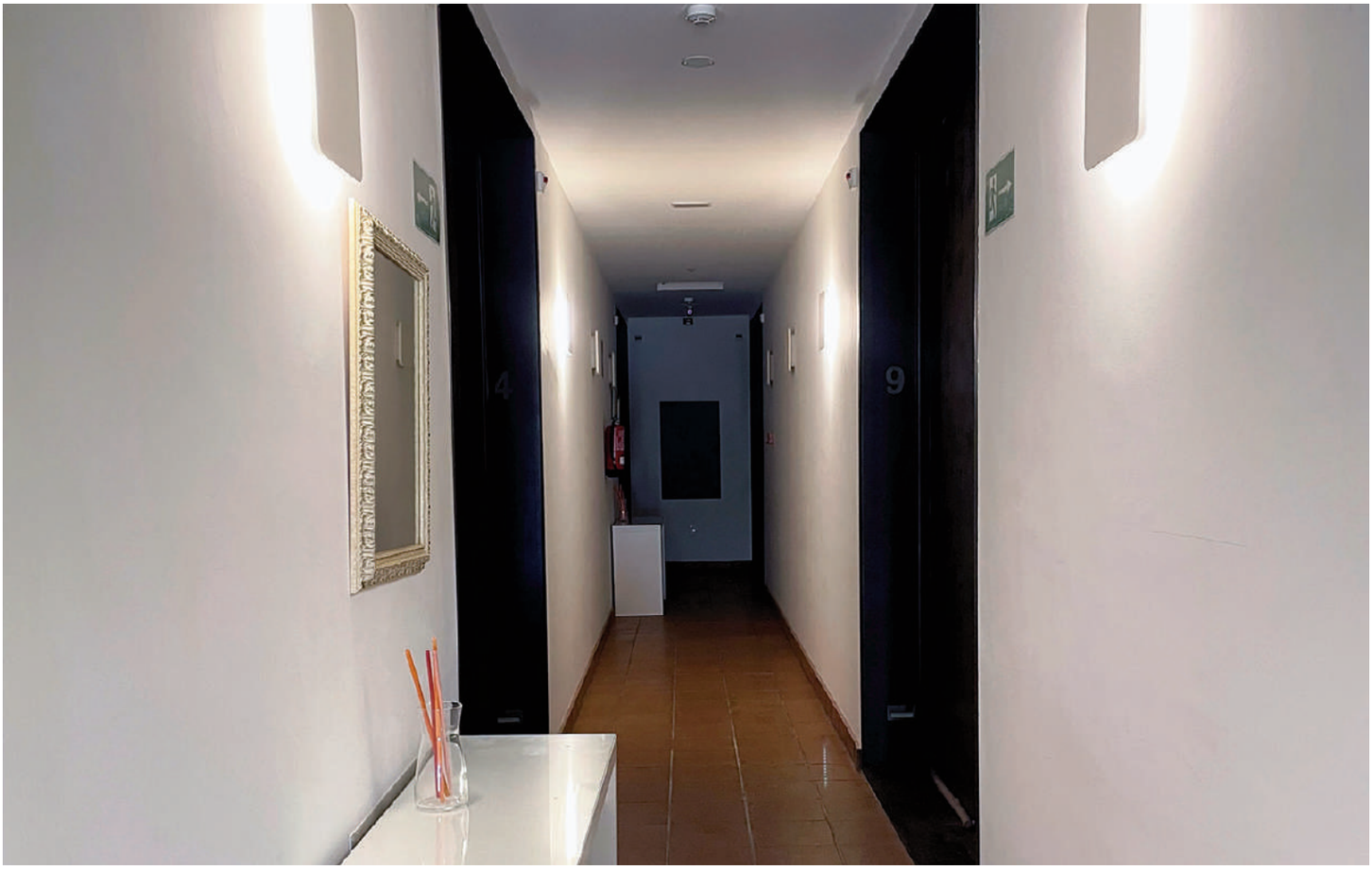
Next page

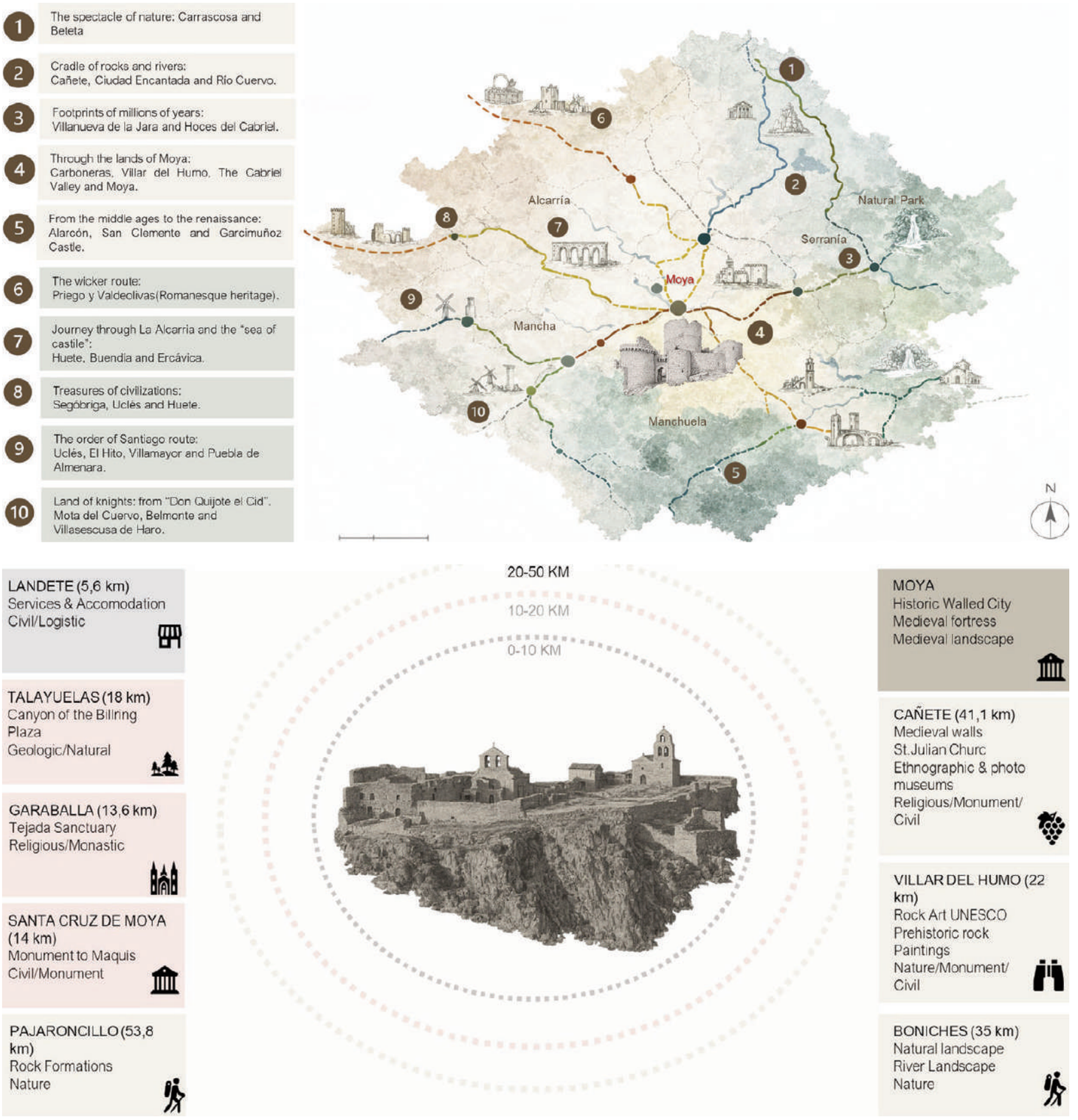
Figg. 12, 13 | Interior spaces of the reconstructed former Church of La Trinidad showing the hospitality layout and the relationship between the inserted structural system and the preserved masonry envelope (credits: the Authors, 2026).

approximately 133 operational days per year, annual availability reaches 1,463 room-nights. Effective occupancy ranges between 366 and 512 room-nights, corresponding to an occupancy rate of 25-35%. Assuming two people per room-night, estimated annual users range between 732 and 1,024. Compared to the resident population of 133 inhabitants, the visitor flow ratio ranges between 5.5 and 7.7, indicating significant proportional external presence despite strong seasonality. These flows are partly explained by the proximity of several heritage sites and natural attractions located within a short travel distance of the fortified settlement (Fig. 7).

Management operates under a multi-year public concession awarded through a negotiated procedure, transferring maintenance and operational responsibilities to the concessionaire and preventing post-rehabilitation abandonment. Employment consists of two to three seasonal positions with indirect local procurement. While institutional continuity is secured, performance remains structurally dependent on seasonal demand and limited mar-




4
9



ket competition typical of extremely low-density territories. Prior to the intervention, the former Church of La Trinidad was in an advanced state of ruin, with no roof, damage to its structural elements and significant deterioration of the masonry surfaces (Fig. 8). The rehabilitation included archaeological excavation, consolidation of the existing masonry, partial reconstruction and the installation of a new roof, ensuring the legibility of the relationship between the preserved masonry palimpsest and the contemporary addition.

The project documentation of the elevations, sections and plans, which highlights the relationship between the preserved masonry and the new structural elements, is presented in Figures 9, 10, and 11. These drawings clarify the technical relationship between the historic envelope and the contemporary intervention: the new roof and independent internal structure, following a 'box-in-box' logic, enabled the functional adaptation of the building while preserving the historic envelope. The new internal configuration and hospitality layout are documented in Figures 12 and 13, illustrating the adaptive reuse of the former ruin as an accommodation facility. Subsequent heritage interventions within the fortified complex attest to the continuing commitment of local institutions; however, it is not possible to establish a direct causal link between the accommodation reuse and subsequent public investment.

Systemic coordination, synergies, and structural limits | The application of the four-indicator

Previous page

Fig. 14 | Main cultural and landscape tourism routes in the Province of Cuenca, showing the territorial positioning of Moya within the regional heritage network (credit: the Authors, 2026).

Fig. 15 | Cultural route connecting several heritage sites in the Serranía de Cuenca and the Cabriel valley, highlighting the territorial position of Moya within this heritage itinerary (credit: the Authors, 2026).





Figg. 16, 17 | Territorial skyline view of Moya and current view of Hotel La Albacara (credits: the Authors, 2026).

evaluation framework reveals a differentiated performance profile. The adaptive reuse of La Trinidad represents the functional reactivation of a protected heritage asset within the local economic system, reintroducing an abandoned structure into regulated use and generating seasonal employment and visitor flows exceeding the resident population (Ivona et alii, 2021; Carocci et alii, 2023). However, its structural impact remains conditioned by governance scale, territorial articulation and demand dependence.

These findings can be interpreted in relation to other European experiences of heritage-led regeneration in abandoned or depopulating settlements. Cases such as Bussana Vecchia (Bogliolo, 2019) in Italy demonstrate how cultural initiatives and artistic communities can reactivate abandoned historic fabrics, while projects such as the interpretation strategies developed in the historic ruins of Belchite in Spain (Alfaro Rodríguez et alii, 2016) illustrate how heritage tourism can generate symbolic and economic value without full reconstruction. Other research has explored reconstruction-oriented strategies aimed at enabling the reinhabitation of partially ruined medieval settlements (Musso and Franco, 2025). Compared with these experiences, the Moya case highlights the importance of governance stability and operational continuity in ensuring that heritage reuse functions as an operational component within territorial systems capable of generating measurable socio-economic activity (Saleh and Ost, 2023).

From a governance standpoint, the concession contract shifts the asset from static preservation to an economically active use model, linking maintenance obligations to economic activity. The building therefore shifts from a consolidated ruin to an active facility sustained partly through operational revenue.

When analysed at the scale of the fortified settlement as a whole, the intervention cannot be understood as an isolated episode. It forms part of a broader system of public heritage actions, within a wider provincial network of cultural and landscape routes (Fig. 14), including the adaptation of the Church of San Bartolomé as a Visitor Reception Centre, the reuse of the former Convent of the Concepcionistas as a multi-purpose space, and consolidation works on defensive structures. These processes have been previously framed within integrated territorial regeneration strategies for the site (Barelles-Vicente et alii, 2025), reflecting institutional continuity and heritage system recovery.

Nevertheless, cumulative investment alone does not guarantee structural transformation. The multiplier effect of these projects depends on their functional articulation through heritage itineraries connecting nearby settlements and cultural sites (Fig. 15): coordination between accommodation, cultural facilities, heritage itineraries and event-based programming is decisive for extending average length of stay, diversifying visitor profiles, and consolidating employment linked to heritage-related activities. The key issue is not the number of

rehabilitated buildings but their operation as an integrated territorial system, as highlighted by network-based territorial approaches, which demonstrate that the effectiveness of heritage reuse depends not only on individual interventions but on their integration within coordinated systems of mobility, hospitality and cultural programming (Cimadomo, Lecardane and Torregrossa, 2025).

In this sense, adaptive reuse may constitute a necessary enabling condition for the economic sustainability of heritage. In contrast to an 'open-air museum' model, where conservation generates recurrent public expenditure without direct economic return, the introduction of productive uses allows maintenance and preservation to be partially supported by the activity generated within the asset itself, a principle increasingly emphasised in recent studies on circular and self-sustaining models of heritage reuse (Foster, 2020; Saleh and Ost, 2024). Heritage conservation becomes linked to operational viability rather than continuous subsidy. However, the transformative capacity of this model remains shaped by structural constraints such as climatic seasonality, a limited entrepreneurial base, and very low demographic density. The negotiated concession procedure and the limited market competition observed reflect moderate investment attractiveness typical of inland rural territories. While institutional continuity is secured, long-term growth depends on the consolidation of a broader territorial network capable of reinforcing demand, strengthening accessibility, and reducing seasonal volatility.

SDG contribution, synergies, and governance conditions | The intervention demonstrates a differentiated contribution to the Sustainable Development Goals. Direct contributions relate to SDG 9 and SDG 10, as adaptive reuse operates as a form of infrastructural innovation by extending the life cycle of heritage assets and integrating new productive functions within existing structures, including governance and management systems. The reactivation of a marginal rural settlement contributes to territorial rebalancing by reintroducing activity and external flows, although its effectiveness depends on the consolidation of local economic structures and long-term territorial integration.

Indirect impacts can be identified in relation to SDG 8 and SDG 11. Beyond direct contributions to SDG 9 and SDG 10, the framework also relates indirectly to SDG 8 (local employment generation) and SDG 11 (heritage preservation and settlement resilience). Potential trade-offs may arise in relation to SDG 12, 13, 15, and 16, particularly when reuse depends on seasonal tourism or external demand.

These dynamics highlight the central role of governance conditions. The sustainability of adaptive reuse depends on multi-level coordination, diversification of economic activities, and integration within wider territorial networks. Without these conditions, risks include external dependence, fragile employment structures and limited local value capture. The principal contribution of this study lies in showing, through measurable and verifiable indicators, that adaptive reuse can operate simultaneously as a heritage conservation strategy and as economic infrastructure. Its value resides not only in physical restoration, but also in its capacity to function as an active support for productive activity and as a mechanism for the financial sustainability of protected heritage assets under conditions of extreme low density.

Conclusions | This study has examined the adaptive reuse of the former Church of La Trinidad in Moya through a four-dimensional settlement-scale framework designed to evaluate implemented heritage interventions as operational territorial infrastructure. Moving beyond object-based conservation assessment, the study reframes adaptive reuse as an evaluable territorial condition linking constructive, operational, and governance dimensions. The results demonstrate that adaptive reuse operates as a regulated productive infrastructure, transforming protected heritage assets into active components of the local economic system; however, these outcomes are not intrinsic to the intervention itself and depend on governance stability, demand continuity, and operational management. The findings confirm that architectural intervention alone is insufficient to produce structural territorial transformation. The impact of heritage-led activation remains conditioned by functional coordination, accessibility patterns, programming coordination, and integration within broader territorial networks. Adaptive reuse, therefore, constitutes a necessary but not sufficient condition for long-term demographic and economic resilience in extremely low-density rural contexts.

The principal contribution of the study lies in the formulation of an indicator-based evaluative framework; however, its applicability remains conditioned by data availability, single-case validation, and the absence of longitudinal assessment. In relation to the Sustainable Development Goals, adaptive reuse can contribute to both heritage conservation and territorial development, although its effectiveness depends on institutional continuity, demand stability, and territorial integration. Ultimately, the study argues that rural heritage sustainability cannot rely exclusively on conservation policy. It requires transforming heritage assets into operational systems capable of generating activity and supporting maintenance through use. When structured through measurable governance and infrastructural logic, adaptive reuse constitutes a viable pathway toward such integration.

Acknowledgements

This paper is part of an ongoing research activity on adaptive reuse and territorial infrastructure developed by the Authors, affiliated with the Department of Architectural Constructions and the Department of Continuous Medium Mechanics and Theory of Structures at the Universitat Politècnica de València (Spain), with affiliation to the Building Technology Research Centre. The research focuses on the evaluation of post-implementation performance of heritage-led regeneration processes in depopulating rural settlements, with specific application to the fortified settlement of Moya (Spain). The research has been conducted since 2024 and is ongoing. It has been developed without external funding and forms part of the Authors' regular scientific activities.

The Authors wish to acknowledge the collaboration of the Diputación Provincial de Cuenca and the Asociación de Amigos de Moya for their contributions to understanding the local context of the case study.

The Authors contributed as follows: conceptualisation and methodological framework, E. Barelles-Vicente and M. E. Torner-Feltrer; data collection, indicator development and case study analysis, E. Barelles-Vicente and M. E. Torner-Feltrer; structural assessment and technical support, M. E. Torner-Feltrer, E. Barelles-Vicente, and J. Llinares Millán; writing and revision, E. Barelles-Vicente, M. E. Torner-Feltrer, and I. Oliver-Faubel.

References

Ajò, G. (2020), "I centri storici del Subappennino Dauno – Un patrimonio in pericolo tra abbandono e sottovalutazione del rischio sismico | The historical centres of the Dauno Subappenine area – A heritage in danger through abandonment and underestimation of seismic risk", in *ArcHistoR*, vol. 7, pp. 1655-1677. [Online] Available at: doi.org/10.14633/ahr288 [Accessed 20 March 2026].

Alfaro Rodríguez, A., Biel, M. P. and Gutiérrez, D. (2016), "Virtual reconstruction applied to the recovery and heritage disclosure of the old village of Belchite", in Lerma, J. L. and Cabrelles, M. (eds), *8th International Congress on Archaeology, Computer Graphics, Cultural Heritage and Innovation – Advanced 3D Documentation, Modelling and Reconstruction of Cultural Heritage, Monuments and Sites, Universitat Politècnica de València, Valencia, September 5-7, 2016*, Editorial Universitat Politècnica de València, València, pp. 231-237. [Online] Available at: doi.org/10.4995/arqueologica8.2016.4175 [Accessed 20 March 2026].

Arfa, F. H., Zijlstra, H., Lubelli, B. and Quist, W. (2022), "Adaptive reuse of heritage buildings – From a literature review to a model of practice", in *The Historic Environment | Policy & Practice*, vol. 13, issue 2, pp. 148-170. [Online] Available at: doi.org/10.1080/17567505.2022.2058551 [Accessed 20 March 2026].

Augustiniok, N., Houbart, C., Plevoets, B. and Van Cleempoel, K. (2025), "Adaptive reuse of built heritage – Conserving and designing with values", in *Journal of Cultural Heritage Management and Sustainable Development*, vol. 15, issue 1, pp. 24-41. [Online] Available at: doi.org/10.1108/JCHMSD-05-2023-0068 [Accessed 20 March 2026].

Baiani, S., Altamura, P., Turchetti, G. and Romano, G. (2024), "Transizione energetica e circolare del patrimonio industriale – Il caso dell'ex SNIA a Roma | Energy and circular transition of the industrial heritage – The Ex SNIA case in Rome", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 15, pp. 190-203. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/15152024 [Accessed 20 March 2026].

Barelles-Vicente, E., Torner-Feltrer, M. E., Llinares Millán, J. and Aparicio-Fernández, C. (2025), "From ruin to resource – The role of heritage and structural rehabilitation in the economic and territorial regeneration of rural areas", in *Land*, vol. 14, issue 9, article 1765, pp. 1-21. [Online] Available at: doi.org/10.3390/land14091765 [Accessed 20 March 2026].

Bizzarri, C. and Micera, R. (2021), "The valorization of Italian borghi as a tool for the tourism development of rural areas", in *Sustainability*, vol. 13, issue 12, article 6643, pp. 1-20. [Online] Available at: doi.org/10.3390/su13126643 [Accessed 20 March 2026].

Bogliolo, C. (2019), *Bussana Vecchia – Rifunzionalizzare il borgo per una valorizzazione a scopo turistico*, Tesi

di Laurea, Università di Pavia, Italia. [Online] Available at: unitesi.unipv.it/handle/20.500.14239/11572 [Accessed 20 March 2026].

BOE – Boletín Oficial del Estado (1982), *Real Decreto 2726/1982, de 3 de septiembre, por el que se declara conjunto histórico-artístico la villa de Moya (Cuenca)*. [Online] Available at: boe.es/boe/dias/1982/11/02/pdfs/A30165-30165.pdf [Accessed 20 March 2026].

Brignoni, M., Dall'Osso, G., Gasparotto, S. and Varini, R. (2023), "Mappatura dei processi design-driven per la rigenerazione delle piccole città fortificate in aree interne | Mapping design-driven processes for the regeneration of small fortified towns in inland areas", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 13, pp. 281-290. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/13242023 [Accessed 20 March 2026].

Campisi, M. T. (2020), "Depopulation of small urban centers – Cultural landscape as a resource for local communities", in Tucci, F. and Sposito, C. (eds), *Resilience Between Mitigation and Adaptation*, vol. 3, pp. 38-53. [Online] Available at: doi.org/10.19229/978-88-5509-096-4/322020 [Accessed 20 March 2026].

Carocci, C. F., Cannizzaro, F., Cocina, S., Di Martino, A., Finocchiaro, R., Impollonia, N., Macca, V., Terrana, A. and Tocci, C. (2023), "Preservation of abandoned historic centres – The case of Poggioreale antica (Sicily)", in *Land*, vol. 12, issue 7, article 1376, pp. 1-16. [Online] Available at: doi.org/10.3390/land12071376 [Accessed 20 March 2026].

Casanovas, X., Alonso Campanero, J. A. and Campisi, T. (2024), "Patrimonio culturale e transizione energetica – Una lezione dal passato | Cultural heritage and energy transition – A lesson from the past", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 15, pp. 58-69. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/1542024 [Accessed 20 March 2026].

Cimadomo, G., Lecardane, R. and Torregrossa, P. M. (2025), "Agenda 2030 per un turismo sostenibile – Il Cammino di Santiago de Compostela e la Trasversale Sicula | 2030 Agenda for sustainable tourism – The Way of Santiago de Compostela and the Ancient Trasversale Sicula", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 17, pp. 80-93. [Online] Available at: doi.org/10.69143/2464-9309/1742025 [Accessed 20 March 2026].

Council of Europe (2005), *Framework Convention on the Value of Cultural Heritage for Society (Faro Convention)*, Faro. [Online] Available at: coe.int/en/web/culture-and-heritage/faro-convention [Accessed 20 March 2026].

Diputación Provincial de Cuenca (n.d.), *Plan de Mejora de Infraestructuras Turísticas de la Provincia de Cuenca (PLAMIT)*. [Online] Available at: dipucuenca.es/plamit [Accessed 20 March 2026].

Eixerés Ros, J. (2025), "Habitat collettivi per la rigenerazione rurale – Una cooperativa edilizia ad Almenara (Spagna) | Collective habitats for rural regeneration – A housing cooperative in Almenara (Spain)", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 18, pp. 238-249. [Online] Available at: doi.org/10.69143/2464-9309/18132025 [Accessed 20 March 2026].

ESPON (2017), *Shrinking Rural Regions in Europe – Towards Smart and Innovative Approaches to Regional Development Challenges in Depopulating Rural Regions*. [Online] Available at: espon.eu/shrinking-rural-regions [Accessed 20 March 2026].

Fiorani, D. (2015), "Castelvecchio Calvisio – The global meaning of a case study", in Crisan, R., Fiorani, D., Kealy, L. and Musso, S. F. (eds), *Conservation-Reconstruction – Small Historic Centres Conservation in the Midst of Change*, EAAE, Hasselt (Belgium), vol. 64, pp. 3-21. [Online] Available at: researchgate.net/publication/276836904 [Accessed 20 March 2026].

Fiorini, L., Saganeiti, L., Perazzini, M., Bontempo, D., Bucci, M., Giancola, M. and Perilli, E. (2025), "L'impatto dei modelli urbani sul supporto sociale – Tra giustizia spaziale e sviluppo sostenibile | The impact of urban models on social support – Between spatial justice and sustainable development", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 17, pp. 196-207. [Online] Available at: doi.org/10.69143/2464-9309/17132025 [Accessed 20 March 2026].

Fonti, R. (2024), "Patrimonio per un futuro sostenibile – Il principio teorico della reversibilità e i suoi riflessi in architettura | Heritage for a sustainable future – The theoretical principle of reversibility and its reflections on architecture", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 16, pp. 144-155. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/16122024 [Accessed 20 March 2026].

Foster, G. (2020), "Circular economy strategies for adaptive reuse of cultural heritage buildings to reduce environmental impacts", in *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 152, article 104507, pp. 1-14. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104507 [Accessed 20 March 2026].

Hussein, F. and Alhebsi, K. (2025), "Adaptive Re-Use of Cultural Heritage Sites – A Strategy for Circular Economy", in *Sustainability*, vol. 17, issue 14, article 6403, pp. 1-17. [Online] Available at: doi.org/10.3390/su17146403 [Accessed 20 March 2026].

INE – Instituto Nacional de Estadística (n.d.), *Cifras oficiales de población resultantes de la revisión del padrón municipal a 1 de enero – Resumen por provincias*. [Online] Available at: ine.es/jaxiT3/Datos.htm?t=2913#_tabs-tabla [Accessed 20 March 2026].

Ivona, A., Rinella, A., Rinella, F., Epifani, F. and Nocco, S. (2021), "Resilient rural areas and tourism development paths – A comparison of case studies", in *Sustainability*, vol. 13, issue 6, article 3022, pp. 1-22. [Online] Available at: doi.org/10.3390/su13063022 [Accessed 20 March 2026].

Khalil, I. and Üzümcüoğlu, D. (2025), "Preserving heritage through a novel framework for the adaptive reuse of Mediterranean earthen houses", in *Vitruvio | International Journal of Architectural Technology and Sustainability*, vol. 10, issue 1, pp. 1-16. [Online] Available at: doi.org/10.4995/vitruvio-ijats.2025.23308 [Accessed 20 March 2026].

Lak, A., Gheitasi, M. and Timothy, D. J. (2020), "Urban regeneration through heritage tourism – Cultural policies and strategic management", in *Journal of Tourism and Cultural Change*, vol. 18, issue 4, pp. 386-403. [Online] Available at: doi.org/10.1080/14766825.2019.1668002 [Accessed 20 March 2026].

Mısırlısoy, D. and Günçe, K. (2016), "Adaptive reuse strategies for heritage buildings – A holistic approach", in *Sustainable cities and society*, vol. 26, pp. 91-98. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.scs.2016.05.017 [Accessed 20 March 2026].

Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (n.d.), "Programa de Recuperación y Utilización Educativa de Pueblos Abandonados (PRUEPA)", in *miteco.gob.es*. [Online] Available at: miteco.gob.es/es/ceneam/programas-de-educacion-ambiental/pueblos-educativos/pruepa-como-surgio.html [Accessed 20 March 2026].

Musso, S. F. and Franco, G. (2025), "Reconstruct to Reinhabit – New Life for an Abandoned and Ruined Medieval Village in Italy", in *Buildings,* vol. 15, issue 8, article 1231, pp. 1-25. [Online] Available at: doi.org/10.3390/buildings15081231 [Accessed 20 March 2026].

Pinilla, V. and Sáez, L. A. (2021), "What do public policies teach us about rural depopulation – The case study of Spain", in *European Countryside,* vol. 13, issue 2, pp. 330-351. [Online] Available at: doi.org/10.2478/euco-2021-0021 [Accessed 20 March 2026].

Pinilla, V. and Sáez, L. A. (2017), "Rural depopulation in Spain – Genesis of a problem and innovative policies", in *Informes CEDDAR*, 2017-2, pp. 1-23. [Online] Available at: roldedeestudiosaragoneses.org/wp-content/uploads/Informes-2017-2-Informe-SSPA1_2017_2_EN-GB.pdf [Accessed 20 March 2026].

Pintossi, N., Kaya, D. I., van Wesemael, P. and Roders, A. P. (2023), "Challenges of cultural heritage adaptive reuse – A stakeholders-based comparative study in three European cities", in *Habitat International*, vol. 136, article 102807, pp. 1-16. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.habitatint.2023.102807 [Accessed 20 March 2026].

Pla-Bañuls, J. and Esparcia, J. (2024), "Properly addressing rural shrinking? – Overview of territorially unbalanced support programmes in Spain", in *Regional Studies, Regional Science*, vol. 11, issue 1, pp. 660-663. [Online] Available at: doi.org/10.1080/21681376.2024.2405175 [Accessed 20 March 2026].

Plevoets, B. and Van Cleempoel, K. (2019), *Adaptive reuse of the built heritage – Concepts and cases of an emerging discipline*, Routledge, London. [Online] Available at: doi.org/10.4324/9781315161440 [Accessed 20 March 2026].

Proietti, A. (2024), "Regeneración de pueblos históricos entre acciones materiales e inmateriales | Regeneration of historic hamlets between material and immaterial actions", in *REIA | Revista Europea de Investigación en Arquitectura*, vol. 24, pp. 44-54. [Online] Available at: doi.org/10.64197/REIA.24.975 [Accessed 20 March 2026].

Rudan, E. (2023), "Circular economy of cultural heritage – Possibility to create a new tourism product through adaptive reuse", in *Journal of Risk and Financial Management*, vol. 16, issue 3, article 196, pp. 1-12. [Online] Available at: doi.org/10.3390/jrfm16030196 [Accessed 20 March 2026].

Saleh, R. and Ost, C. (2024), "Circular Business Model for Cultural Heritage Adaptive Reuse – An Iterative Journey", in Fusco Girard, L. and Gravagnuolo, A. (eds), *Adaptive Reuse of Cultural Heritage – Circular Business, Financial and Governance Models*, pp. 433-461, Springer, Cham. [Online] Available at: doi.org/10.1007/978-3-031-67628-4_16 [Accessed 20 March 2026].

Saleh, R. and Ost, C. (2023), "Innovative business model for adaptive reuse of cultural heritage in a circular economy perspective", in *International Journal of Entrepreneurship and Small Business*, vol. 48, issue 1, pp. 39-77. [Online] Available at: doi.org/10.1504/IJESB.2023.10053086 [Accessed 20 March 2026].

Sorbo, E., Moretto, T., Grandi, S. and Modena, G. (2025), "Identità culturali e sviluppo sostenibile – Un modello metodologico per l'Arsenale di Venezia | Cultural identity and sustainable development – A methodological model for the Venetian Arsenal", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 17, pp. 130-145. [Online] Available at: doi.org/10.69143/2464-9309/1782025 [Accessed 20 March 2026].

Tao, R., Chen, P. and Aoki, N. (2025), "Conceptual changes and controversies in rural historical building relocation in China under the heritage adaptive reuse discourse", in *Built Heritage*, vol. 9, issue 1, article 6, pp. 1-16. [Online] Available at: doi.org/10.1186/s43238-024-00172-x [Accessed 20 March 2026].

Throsby, D. (2019), "Heritage economics – Coming to terms with value and valuation", in Avrami, E., Macdonald, S., Mason, R. and Myers, D. (eds), *Values in Heritage Management – Emerging Approaches and Research Directions*, The Getty Conservation Institute, Los Angeles, pp. 199-209. [Online] Available at: getty.edu/publications/virtuallibrary/pdf/9781606066195.pdf#page=213 [Accessed 20 March 2026].

Toscano, V. (2023), "Cultural Heritage and Sustainable Development – How Does Accounting Matter?", in *Accounting for Cultural Heritage Management – Resilience, Sustainability and Accountability*, Palgrave Macmillan, Cham, pp. 85-135. [Online] Available at: doi.org/10.1007/978-3-031-38257-4_4 [Accessed 20 March 2026].

UNESCO (2023), *Operational Guidelines for the Implementation of the World Heritage Convention*. [Online] Available at: whc.unesco.org/en/guidelines/ [Accessed 20 March 2026].

ARCHITECTURE
Research & Experimentation

AGATHÓN – International Journal of Architecture, Art and Design | n. 19 | 2026 | pp. 134-149
ISSN print: 2464-9309 – ISSN online: 2532-683X | doi.org/10.69143/2464-9309/1982026

Article Info

Received 10 March 2026
Revised 16 April 2026
Accepted 21 April 2026
Published 30 June 2026

IL PATRIMONIO INDUSTRIALE AD HANOI
Una valutazione multiscalare per il riuso adattivo di una innovativa infrastruttura urbana

INDUSTRIAL HERITAGE IN HANOI
A multi-scalar assessment for adaptive reuse and innovative urban infrastructure

Thai Huyen Nguyen

Abstract

Nelle città asiatiche l'urbanizzazione rapida ha prodotto un paradosso: le città entrano in una fase 'post-industriale' mentre l'industrializzazione è ancora in corso. Ad Hanoi (Vietnam) le politiche di rilocalizzazione delle fabbriche all'interno della città hanno favorito processi di riqualificazione fondati sulla demolizione, erodendo il Patrimonio industriale e precludendo opportunità di innovazione. In tale quadro il contributo indaga la rifunzionalizzazione del Patrimonio industriale come infrastruttura urbana inclusiva, in grado di concorrere al raggiungimento dell'SDG 9. Il contributo illustra la ricerca EUNIC 'Repurposing Industrial Heritage' (2021-2022) che, adottando un approccio in quattro fasi e una metodologia mista – mappatura di 95 siti, analisi morfologica, indagine su 1.040 intervistati e confronto tra 104 casi internazionali – elabora uno Strumento di Valutazione Strategica per orientare le decisioni di rigenerazione in coerenza con le condizioni istituzionali di Hanoi.

In Asian cities, rapid urbanisation has produced a paradox: these cities enter a 'post-industrial' phase while industrialisation remains ongoing. In Hanoi (Vietnam), for example, relocation policies for inner-city factories have driven demolition-led redevelopment, eroding industrial heritage and foreclosing opportunities for innovation. This paper examines repurposing industrial heritage as inclusive urban infrastructure contributing to SDG 9. Drawing on the EUNIC project 'Repurposing Industrial Heritage' (2021-2022), it applies a four-phase mixed-methods approach: spatial mapping of 95 facilities, morphological analysis, a community survey of 1,040 respondents, and comparison of 104 international cases. The research develops a Strategic Assessment Toolkit to support regeneration decisions calibrated to Hanoi's institutional conditions.

Keywords

patrimonio industriale, riuso adattivo, infrastruttura inclusiva, rigenerazione urbana, strumento di supporto decisionale

industrial heritage, adaptive reuse, inclusive infrastructure, urban regeneration, decision-support toolkit



Thai Huyen Nguyen, Architect and PhD, is a Lecturer-researcher at the Institute of International Training and Cooperation, Hanoi Architectural University (Vietnam). Her research and teaching focus on landscape architecture, urban transformation, and industrial heritage, with expertise in comparative methodologies and field-based research. She leads major international projects (Erasmus+, EUNIC, IRD) and has been an invited professor at several French universities. She was awarded the French Order of Academic Palms (Chevalier) in 2025. E-mail: huyen.nt@hau.edu.vn

La rapida urbanizzazione in Asia ha creato una situazione paradossale: molte città si trovano in una fase post-industriale, mentre il processo di industrializzazione è ancora in corso. Ciò porta a una crescente concentrazione di siti produttivi sottoutilizzati nelle aree interne, mentre nuovi impianti si espandono in periferia (Fan and Scott, 2003; Yee Sing and Yoh, 2016; Yusuf and Nabeshima, 2005; Zhang, 2007). Ad Hanoi (Vietnam) la delocalizzazione forzata di 95 impianti industriali dal centro alla periferia urbana, avvenuta per motivi ambientali di decongestionamento del traffico e di ottimizzazione dell'uso del suolo, è stata trattata principalmente come un problema tecnico-pianificatorio. Questa nuova situazione ha spesso trascurato il valore culturale e il potenziale spaziale dei siti dismessi, favorendo di fatto la loro demolizione per consentire interventi di sviluppo immobiliare.

I principali riferimenti internazionali sulla tutela del Patrimonio industriale, tra cui la Nizhny Tagil Charter (TICCIH, 2003) e i Princìpi di Dublino (ICOMOS and TICCIH, 2011; Plevoets and Van Cleempoel, 2019; Arbab and Alborzi, 2022), si sono affermati soprattutto in Europa occidentale, dove l'industrializzazione era già conclusa prima dell'emergere del dibattito sulla loro conservazione. Da questa fase storica deriva un'interpretazione che il contributo definisce come tensione di matrice post-industriale: un'impostazione teorica e valutativa che privilegia la conservazione di attività industriali ormai cessate piuttosto che la trasformazione adattiva di paesaggi produttivi ancora in evoluzione. In città come Hanoi, dove l'industrializzazione e la transizione post-industriale avvengono contemporaneamente, i siti dismessi non sono solo testimonianze storiche ma costituiscono anche infrastrutture con potenzialità ancora inespresse, riattivabili (Kennedy, Cuddihy and Engel-Yan, 2007; Larkin, 2013; Barles, 2010).

Tali siti possono accogliere nuove forme di produzione, attività culturali e dispositivi di infrastrutturazione sociale, entrando in una logica di riuso attivo che va oltre la semplice conservazione. Recenti studi hanno ulteriormente ampliato questa prospettiva esplorando i siti industriali dismessi come risorse strategiche per la transizione energetica e circolare, dimostrando come interventi di riuso adattivo possano attivare nuovi cicli di materiali, energia e acqua che trascendono l'edificio, coinvolgendo il territorio urbano circostante (Baiani et alii, 2024).

La letteratura più recente evidenzia con chiarezza la necessità di disporre di quadri metodologici integrati, capaci di mettere in relazione, all'interno di un medesimo dispositivo analitico e operativo, i principi della conservazione, gli obiettivi della sostenibilità e le istanze dello sviluppo urbano che attraversano i processi di rigenerazione del Patrimonio (Sorbo et alii, 2025). Parallelamente linee di ricerca sempre più consolidate sottolineano la centralità di strategie di rigenerazione orientate alla comunità, ritenute decisive sia per rafforzare il valore sociale delle aree industriali dismesse sia per ampliare le forme di partecipazione civica nei processi di riuso adattivo (Mehan, 2025). Letti congiuntamente tali orientamenti inducono a superare una lettura del Patrimonio industriale limitata alla sola dimensione conservativa, riconducendone invece la rigenerazione a una questione più ampia che investe simultaneamente la configurazione dell'infrastruttura urbana, le modalità della governance e la costruzione di nuove condizioni d'uso collettivo.

In questo quadro altre ricerche confermano il permanere di alcune criticità strutturali: la netta prevalenza di studi europei, la mancanza di quadri interpretativi capaci di connettere il Patrimonio industriale ai processi di rigenerazione urbana e la limitata traduzione degli esiti della ricerca in strumenti pratici a supporto di politiche pubbliche (Çeltekligil and Arabacıoglu, 2025; Szopinska-Mularz et alii, 2025).

È in risposta a tali criticità che il presente studio propone di interpretare il Patrimonio industriale di Hanoi come infrastruttura urbana dedicata all'innovazione, capace di contribuire al raggiungimento dell'SDG 9; a tal fine sviluppa uno Strumento di Valutazione Strategica (SAT) che combina analisi urbane e architettoniche, rilevazioni sociologiche e confronti con casi internazionali (UNESCO, 2023). Il contributo si articola in due domande di ricerca principali: innanzitutto se gli impianti industriali delle città a industrializzazione tardiva, come Hanoi, possano essere considerati Patrimonio nonostante la loro recente costruzione; in secondo luogo quali modelli di riconversione internazionale possano offrire indicazioni effettivamente applicabili.

Il contributo introduce tre principali avanzamenti: sul piano teorico introduce il concetto di 'pregiudizio post-industriale' per spiegare perché i quadri interpretativi dominanti su questo Patrimonio tendano a sottovalutare sistematicamente i siti industriali nelle città interessate da un'industrializzazione più tardiva; sul piano metodologico propone lo Strategic Assessment Toolkit (SAT), uno strumento di supporto alle decisioni articolato in cinque criteri e replicabile anche al di là del caso di Hanoi; sul piano empirico si fonda su un corpus originale di dati costruito con un approccio misto, che comprende 95 impianti industriali, 1.040 risposte a un'indagine rivolta alla comunità locale e 104 casi internazionali di riconversione.

Il saggio è articolato in diverse sezioni che illustrano la metodologia della ricerca, i risultati dell'indagine su Hanoi, l'analisi dei casi internazionali, il framework SAT e infine la discussione teorica e le conclusioni, con riflessioni sulla trasferibilità del modello e alle sue implicazioni per le politiche. I risultati possono risultare di interesse per studiosi, pianificatori e operatori del Patrimonio impegnati in contesti di rapida urbanizzazione, nei quali la conservazione e la trasformazione attiva dei siti industriali si intrecciano simultaneamente.

Metodologia della ricerca | Lo studio adotta un impianto metodologico multiscalare e una metodologia mista, in cui i siti industriali vengono considerati simultaneamente organismi architettonici, componenti spaziali del tessuto urbano ed entità inscritte nei dispositivi di pianificazione e di governance (Creswell and Plano Clark, 2018; Yin, 2018; Meng, Zhi and Pang, 2023; UNESCO, 2023). Il corpus empirico alla base dell'indagine è stato costruito nell'ambito del progetto EUNIC 'Repurposing Industrial Heritage' (2021-2022) e articolato in quattro fasi tra loro complementari, concepite per restituire la natura stratificata del fenomeno indagato. Impostazioni di ricerca di questo tipo trovano oggi crescente applicazione negli studi sul Patrimonio e sulla rigenerazione urbana poiché consentono di affrontare in modo più adeguato l'intreccio tra le dimensioni spaziali, culturali e socioeconomiche che caratterizza i siti di interesse storico-culturale e ne orienta i possibili scenari di trasformazione (Mehan, 2025). La Fase 1, dedicata alla mappatura spaziale e all'analisi della struttura urbana, ha comportato un'indagine GIS su 95 siti industriali inclusi nel provvedimento di rilocalizzazione emanato con decisione del Primo Ministro (Nguyen, 2025). Per ciascun sito sono state rilevate e messe in relazione quattro variabili principali: la collocazione all'interno dell'impianto centro-periferia della città, la dimensione del lotto in rapporto all'indice di copertura edilizia, il grado di accessibilità al sistema dei trasporti e la relazione con gli spazi pubblici e le infrastrutture di comunità presenti nel contesto limitrofo. La selezione di tali variabili risponde all'esigenza di valutare il potenziale di integrazione dei singoli siti nel tessuto urbano circostante attraverso strategie di riuso adattivo, coerentemente con una prospettiva di rigenerazione urbana e con il più ampio dibattito sul ruolo dello spazio pubblico nei processi contemporanei di trasformazione della città (Berretta, Desideri and Staltari, 2024).

La Fase 2, dedicata alla ricerca d'archivio e all'analisi della morfologia architettonica, ha riguardato la valutazione del valore culturale di 95 siti attraverso un quadro interpretativo sviluppato dal gruppo di ricerca EUNIC-HAU[1] e basato su approcci di valutazione già consolidati in letteratura e nella prassi di settore (TICCIH, 2003; Plevoets and Van Cleempoel, 2019; Djebbour and Biara, 2020; Sorbo et alii, 2025). Ciascun sito è stato analizzato considerando quattro ambiti: le informazioni generali, il valore culturale, lo stato della pianificazione vigente e il contesto degli stakeholder (Fig. 1). Tra i 28 siti industriali dismessi che hanno mostrato un valore culturale significativo dieci sono stati selezionati per un approfondimento mirato, per i quali è stato valutato il potenziale di integrazione con il contesto, il rilievo dei manufatti e i caratteri architettonici consolidati.

La Fase 3, l'indagine sulle percezioni della comunità, si è svolta tra il 6 e il 20 ottobre 2021 mediante un sondaggio online, esteso alla scala urbana, finalizzato a rilevare gli orientamenti sulla rilocalizzazione e sui possibili scenari di riuso dei siti industriali. Il questionario è stato diffuso tramite reti professionali e canali comunitari, con campionamento volontario. Sono state raccolte complessivamente 1.040 risposte, riconducibili a tre principali categorie di portatori di interesse: 1) gli attori direttamente legati alle fabbriche, tra cui proprietari, gestori e lavoratori; 2) i residenti nelle vicinanze dei siti oggetto di rilocalizzazione; 3) un insieme più ampio di soggetti coinvolti a vario titolo nei processi di sviluppo urbano e di patrimonializzazione, tra cui Autorità locali, urbanisti, architetti, esperti e potenziali fruitori degli spazi rigenerati.

L'indagine ha previsto domande a risposta chiusa relative alla conoscenza delle politiche, agli impatti percepiti e alle preferenze sugli indirizzi di riqualificazione e quesiti aperti per far emergere orientamenti, aspettative e valutazioni sul Patrimonio industriale e sulle pratiche di riuso adattivo. In questo modo il sondaggio ha fornito la base conoscitiva per verificare quanto le scelte di pianificazione risultassero coerenti con le istanze dei diversi portatori di interesse.

La Fase 4, dedicata al confronto con casi internazionali, è stata finalizzata all'individuazione di schemi di rigenerazione trasferibili al contesto di Hanoi. A tale scopo è stata costruita una banca dati con 104 progetti internazionali di riconversione del Patrimonio industriale, elaborata attraverso il con-



Fig. 1 | The EUNIC-HAU research team conducting a survey at an industrial production facility scheduled for relocation from Hanoi's inner city (credit: the Author, 2022).

tributo di 11 Istituzioni partner e integrata da una mirata attività di ricerca documentale. La selezione dei casi è avvenuta mediante un campionamento ragionato, definito sulla base di criteri volti a garantirne la comparabilità con i siti industriali di Hanoi.

Tra i principali criteri adottati rientrano la completezza della documentazione disponibile (piante, sezioni e informazioni sulla distribuzione degli spazi), la conservazione dei volumi originari, la collocazione in ambito urbano, la riconducibilità a periodi costruttivi comparabili con quelli dei siti industriali di Hanoi (1890-1960) e l'appartenenza a tipologie produttive analoghe a quelle storicamente presenti nella città, quali birrifici, officine ferroviarie, impianti elettrotecnici, manifatture del tabacco, del tessile e della piccola produzione. Il corpus dei casi studio comprende sia grandi complessi industriali, con superfici comprese tra 5.000 e 60.000 m^2, sia interventi di minore dimensione, purché in grado di accogliere strategie di rigenerazione particolarmente efficaci.

I casi selezionati sono stati analizzati secondo quattro chiavi di lettura principali: i modelli di governance, i meccanismi di finanziamento, i programmi funzionali e i processi di attuazione. Tale impostazione si colloca nel solco degli approcci comparativi oggi ampiamente adottati negli studi dedicati alla rigenerazione dei paesaggi post-industriali, nei quali la comprensione delle condizioni di governance, economiche e programmatiche risulta decisiva per valutare l'effettiva trasferibilità delle soluzioni individuate (Mehan, 2025).

Integrazione dei dati e limiti | Gli esiti delle quattro fasi sono stati sintetizzati in un quadro analitico multicriteriale che comprende le evidenze spaziali, architettoniche, sociali e internazionali, costituendo così la base empirica del SAT. Quadri multicriteriali analoghi sono stati recentemente proposti per sostenere i processi decisionali nei progetti di rigenerazione del Patrimonio e di riuso adattivo (Sorbo et alii, 2025).

Ma dei limiti esistono: in primo luogo la banca dati dei casi internazionali riflette una collocazione geografica a favore degli esempi europei, dovuta al ricorso alla rete EUNIC; in secondo luogo le valutazioni sulla governance si basano principalmente su fonti secondarie, poiché le interviste dirette con gli esponenti politici non rientravano nel perimetro del progetto; infine lo studio non affronta la dimensione di genere della storia del Patrimonio industriale ad Hanoi, oggi emergente nella letteratura internazionale sul costruito (Garda et alii, 2025) e che future ricerche potranno utilmente integrare nei quadri di valutazione del Patrimonio.

Gli esiti dell'indagine sui siti industriali di Hanoi | L'analisi dei 95 siti industriali mette in discussione l'assunto di fondo implicito nell'impostazione tecnica delle politiche di rilocalizzazione, secondo cui tali siti costituirebbero elementi periferici o residuali della struttura urbana (Kennedy, Cuddihy and Engel-Yan, 2007; Barles, 2010). La maggior parte dei

siti industriali di Hanoi si colloca all'interno del centro o in immediata adiacenza alla cintura urbana consolidata nel periodo dell'industrializzazione socialista (1960-1980), ormai assorbita nel denso tessuto della città.

I cinque principali distretti[2] – Long Biên, Hai Bà Trung, Dong Da, Thanh Xuân e Hoàng Mai – concentrano 69 dei 95 siti industriali (Tab. 1). Le dimensioni dei lotti variano da meno di 0,3 ha (27 siti con laboratori e spazi produttivi di piccola scala) a oltre 5 ha (9 siti), includendo le officine ferroviarie di Gia Lâm (circa 20 ha), che hanno le maggiori potenzialità di riuso adattivo (Fig. 2). Alcuni caratteri ricorrenti – campate libere di 500 m^2 o più, altezze interne comprese tra 6 e 12 m, strutture in calcestruzzo o acciaio di adeguata sezione e ampi cortili – testimoniano qualità spaziali e strutturali che un approccio di intervento fondato sulla demolizione cancellerebbe in modo irreversibile.

Sulla base della documentazione archivistica disponibile, 82 dei 95 siti industriali censiti sono stati ricondotti a uno dei tre periodi di realizzazione individuati, mentre per i restanti 11 non è stato possibile stabilire una datazione attendibile pur da fonti accessibili (Fig. 3). All'insieme esaminato, 28 siti presentano un valore culturale rilevante, tale da giustificarne l'inclusione tra i casi cui attribuire priorità di tutela (Tab. 2; Fig. 4). Di particolare interesse risultano i siti industriali realizzati tra il 1954 e il 1986; in quanto testimonianza materiale dell'economia dell'epoca basata sui sussidi questi impianti condensano stratificazioni di memoria collettiva del lavoro che i criteri convenzionali di valutazione, generalmente calibrati sul riconoscimento della qualità formale e dell'eccezionalità compositiva architettonica, faticano a restituire in maniera adeguata e sistematica (Figg. 5-8).

I documenti di Piano di Hanoi assegnano ai 95 siti da rilocalizzare diverse destinazioni d'uso e in particolare: 20 siti sono destinati a uso misto con residenza, 19 a uso misto senza residenza, 14 a istruzione e formazione, 10 a spazio pubblico o verde, 10 a uso direzionale e commerciale, 10 a uso residenziale e 1 a uso culturale, mentre 11 non hanno una destinazione definita (Fig. 9). Il confronto tra tali indirizzi pianificatori, gli esiti dell'indagine sulla comunità e il dataset internazionale fa emergere un divario strutturale articolato su tre piani distinti ma strettamente interrelati (Tab. 3).

Il dato più significativo riguarda la quasi totale assenza di programmazione culturale nel quadro pianificatorio di Hanoi: a essa è infatti destinato appena l'1% dei siti, a fronte del 55% rilevato tanto nelle preferenze espresse dalla comunità quanto nei casi internazionali di riconversione ritenuti di successo. Tale scarto evidenzia la subordinazione sistemica dei valori culturali a una logica di massimizzazione della rendita fondiaria, tipica dei contesti in cui le municipalità dipendono in misura consistente dalle entrate connesse alla concessione dei suoli (Grodach and Loukaitou-Sideris, 2007; Yee Sing and Yoh, 2016).

L'indagine mette inoltre in luce un rilevante deficit informativo (Lee, Song and Ducruet, 2008): se il 56,1% dei residenti dichiarava di avere opinioni chiare in merito alla rilocalizzazione, soltanto il 49% disponeva di informazioni puntuali sui progetti previsti nelle immediate vicinanze della propria residenza. Anche la percezione degli impatti restituisce un quadro più articolato rispetto alla rappresentazione convenzionale della 'fabbrica inquinante': il 38,2% degli intervistati non ha segnalato effetti significativi e l'8,1% ha rilevato ricadute positive, a fronte del 29,7% che ha invece indicato effetti negativi (Fig. 10).

Casi internazionali di riuso adattivo | L'analisi dei 104 casi internazionali (Fig. 11) restituisce una configurazione funzionale a prevalenza culturale: il 55% dei siti è stato riconvertito in attrezzature culturali, il 21% in complessi misti a destinazione non residenziale, il 10% in spazi pubblici, mentre nel 93% dei casi l'intervento ha comportato una conversione funzionale completa. Il dato conferma che, sul piano internazionale, il riuso adattivo tende a privilegiare le funzioni culturali e pubbliche rispetto a usi di matrice prevalentemente speculativa (Grodach and Loukaitou-Sideris, 2007; Sun and Chen, 2023).

Per un'analisi più approfondita sono stati selezionati dieci progetti, ritenuti rappresentativi di diverse modalità di riconversione del Patrimonio industriale; le loro caratteristiche e la relativa valutazione comparativa sono riportate nelle Tabelle 4 e 5. I casi considerati coprono un ventaglio articolato di strategie trasformative che spaziano dal riuso a fini culturali e dallo sviluppo delle industrie creative fino all'integrazione paesaggistica e ai processi di rigenerazione attivati da interventi a forte valenza iconica. Tali esperienze vengono esaminate in modo sistematico in tre categorie analitiche: modelli di gestione, modelli funzionali e idee di rottura.

Les Abattoirs Museum (Toulouse) e La Friche Belle-de-Mai (Marseille) mostrano assetti di governance differenti ma ugualmente capaci di garantire condizioni di sostenibilità nel tempo (Andres and Grésillon, 2011; Grésillon, 2011); Nod Makerspace (Bucharest) dimostra che una riconversione orientata all'innovazione può essere realizzata anche in presenza di risorse finanziarie limitate (Romanelli and Zbuchea, 2020); Gasometer Oberhausen e Carrières de Lumières (Les Baux-de-Provence) evidenziano infine come una programmazione di elevata intensità esperienziale possa ampliare in misura significativa il coinvolgimento della comunità (López-Bravo, Lonardo and Rosado, 2020; Gürcanlı et alii, 2024). Nel loro insieme i casi analizzati indicano che l'efficacia della riconversione dipende dalla coerenza tra modello gestionale, investimento disponibile e programma d'uso, più che da un'unica configurazione di governance (Moldoveanu and Franc, 2014; Putilov and Bazilevich, 2021).

Strumento di Valutazione Strategica (SAT) | Gli esiti dell'analisi sono stati ricomposti in un SAT concepito per sostenere i processi decisionali nella rigenerazione del Patrimonio industriale di Hanoi. Lo strumento integra le evidenze provenienti dalle quattro fasi della ricerca (mappatura spaziale, analisi architettonica, indagine sulla comunità e confronto con casi internazionali) entro un quadro strutturato per valutare il potenziale di riuso adattivo dei siti industriali. Approcci valutativi multicriteriali di questo tipo sono sempre più adottati nella pianificazione del Patrimonio per sostenere i processi decisionali in contesti complessi di rigenerazione (Cellucci, Revellini and Tatano, 2025; Sorbo et alii, 2025). Il SAT non opera come sistema rigido di classificazione ma come dispositivo multicriteriale di supporto alle decisioni e sulla base dei 104 casi internazionali organizza gli indicatori in cinque dimensioni chiave (Tab. 6), assunte come fattori decisionali ponderabili e adattabili alle condizioni istituzionali e finanziarie locali (Fig. 12). Il primo criterio, 'integrazione spaziale e urbana', valuta la relazione fisica tra i siti industriali e l'impianto urbano circostante attraverso tre indicatori: collocazione interna al tessuto consolidato di Hanoi; accessibilità al trasporto pubblico, misurata in base alla distanza pedonale dalla fermata del trasporto pubblico più vicina; permeabilità spaziale, intesa come capacità del sito di integrarsi con gli spazi pubblici adiacenti. L'analisi GIS conferma che la maggior parte dei 95 siti industriali occupa posizioni strategicamente integrate, suggerendo un forte potenziale di riuso adattivo come componente dell'infrastruttura pubblica e culturale della città (Berretta, Desideri and Staltari, 2024). La progettazione di spazi pubblici aperti, permeabili e accessibili, intesi come infrastrutture di connessione tra gli ex siti industriali e il tessuto urbano circostante, si inscrive all'interno dei principi più ampi dell'abitabilità urbana sostenibile. In questa prospettiva integrazione spaziale, accessibilità pedonale e coinvolgimento della comunità sono riconosciuti come fattori tra loro interdipendenti, decisivi per l'efficacia dei processi di trasformazione adattiva (Lanini et alii, 2025).

District	No. of industrial facilities
Long Biên	17
Hai Bà Trưng	18
Đống Đa	14
Thanh Xuân	13
Hoàng Mai	9
Other districts	24
Total	**95**

Tab. 1 | Distribution of 95 facilities by district (credit: EUNIC-HAU, 2022).

Il secondo gruppo di criteri, 'valore culturale', viene valutato attraverso indicatori quali il valore storico, i caratteri architettonici, la configurazione spaziale e la memoria socio-storica associata alla produzione industriale e alla storia del lavoro. Questa ampia chiave di lettura recepisce gli orientamenti più recenti della ricerca, che sottolineano la necessità di considerare, nei processi di rigenerazione, tanto le dimensioni materiali quanto quelle immateriali del Patrimonio industriale (Sorbo et alii, 2025).

Il terzo gruppo di criteri, 'governance e fattibilità economica', prende in esame la gestione, i meccanismi di finanziamento e la compatibilità con i quadri normativi esistenti. L'analisi comparativa dei 104 casi internazionali mostra che i progetti di rigenerazione di successo raramente si fondano su un unico modello di governance; piuttosto dipendono dalla capacità di combinare regia istituzionale, investimento privato e coinvolgimento attivo della comunità. Questa logica multiattore, nella quale la Pubblica Amministrazione definisce le norme di attuazione mentre la società civile e gli attori privati apportano risorse e programmazione, è stata riconosciuta come una condizione ricorrente per la sostenibilità di lungo periodo dei processi di rigenerazione (UNESCO, 2011; Cellucci, Revellini and Tatano, 2025). La valutazione di fattibilità all'interno del SAT considera quindi la sostenibilità economico-finanziaria e la misura in cui un determi-

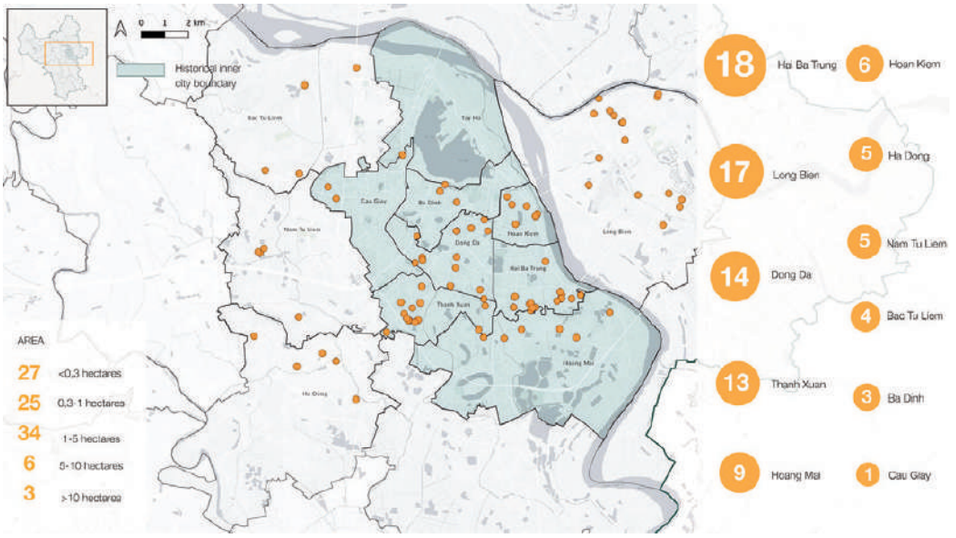


Fig. 2 | Distribution of industrial production facilities in the relocation list in Hanoi (credit: EUNIC-HAU, 2022).

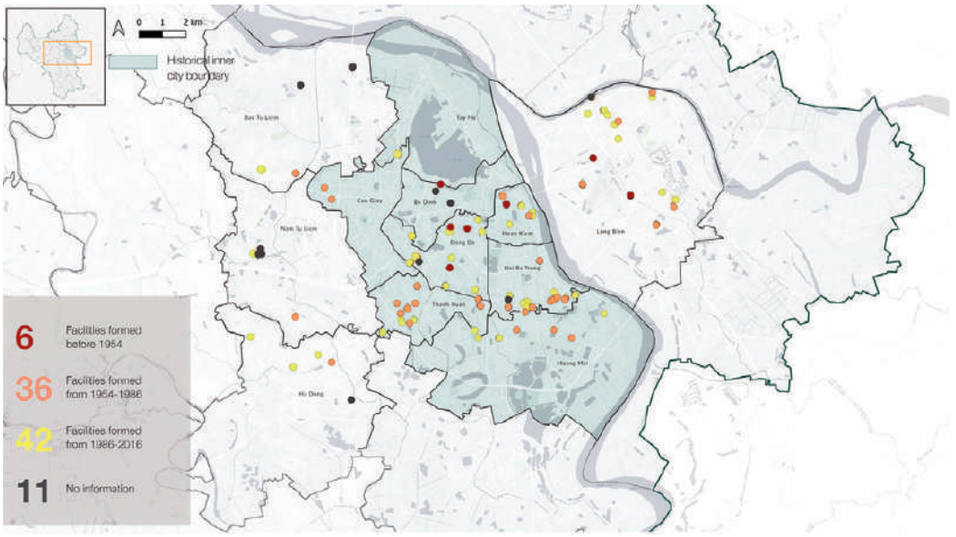


Fig. 3 | Formation and development history of industrial facilities (credit: EUNIC-HAU, 2022).

nato assetto di governance sia in grado di sostenere nel tempo usi inclusivi.

Il quarto gruppo di criteri, 'capacità di innovazione', consente ai siti industriali dismessi di operare come infrastrutture urbane orientate all'innovazione, contribuendo allo sviluppo economico basato sulla conoscenza e risultando coerenti con l'SDG 9. Il potenziale di attivazione turistica e culturale delle infrastrutture industriali rifunzionalizzate è stato ulteriormente confermato da analisi parametriche di progetti di riqualificazione in differenti contesti di governance (López-Bravo, Lonardo and Rosado, 2020; Mehan, 2025).

Il quinto gruppo di criteri, 'inclusione sociale', affronta il deficit di consultazione e coinvolgimento emerso dall'indagine sulla comunità, incorporando tre indicatori misurabili: la percentuale della superficie proposta destinata a usi non commerciali e accessibile alla comunità; il grado di coinvolgimento degli stakeholder nelle decisioni sulla programmazione, dalla semplice comunicazione successiva alle decisioni fino alla co-progettazione; il rischio di migrazione insediativa, valutato in relazione ai cambiamenti attesi nei valori fondiari e nei canoni di locazione delle aree circostanti rispetto alla media urbana. Questa dimensione consente di collegare l'interesse pubblico per funzioni culturali e civiche, rilevato nei 1.040 questionari, alla necessità di dispositivi di governance capaci di monitorare gli effetti redistributivi della rigenerazione (Cellucci, Revellini and Tatano, 2025; Ricci, Poli and Marino, 2025).

Nel loro insieme queste cinque dimensioni configurano un quadro integrato che connette aspetti spaziali, culturali, di governance, di innovazione e sociali. Il SAT fornisce dunque una base strutturata per confrontare diverse opzioni di rigenerazione e individuare strategie in grado di bilanciare la tutela del Patrimonio con gli obiettivi di sviluppo urbano.

Riformulare il patrimonio industriale: da oggetto di conservazione a infrastruttura urbana inclusiva | Gli esiti del SAT non si limitano a mostrare la parziale inadeguatezza dei quadri consolidati per la valutazione del Patrimonio industriale dismesso ma ne sollecitano una revisione critica più radicale. La Carta di Nizhny Tagil e i Principi di Dublino si sono infatti redatti in contesti in cui il ciclo dell'industrializzazione si era in larga misura compiuto prima che si affermasse il dibattito sulla conservazione degli ex impianti produttivi. È in tale scarto storico che prende forma quella che il presente studio interpreta come una 'distorsione post-industriale': essa emerge nel momento in cui tali apparati valutativi vengono applicati ai siti urbani, dove industrializzazione e transizione post-industriale avvengono simultaneamente, producendo effetti distorsivi. Nel caso di Hanoi ciò comporta una sistematica sottovalutazione delle strutture del periodo socialista, comprese tra il 1954 e il 1986, penalizzate da sistemi di valutazione che tendono a privilegiare la qualità architettonica e la riconoscibilità formale rispetto al loro significato socio-storico.

Questa distorsione agisce su due piani: da un lato i criteri correnti svalutano il Patrimonio industriale del periodo socialista, il cui valore risiede soprattutto nella memoria del lavoro e nell'identità dell'impianto architettonico connesso all'economia dell'epoca basata sui sussidi; dall'altro le qualità spaziali proprie di questi edifici – l'ampiezza delle superfici libere, la robustezza dei sistemi strutturali, la ricorrenza di configurazioni a corte – restano per lo più illeggibili entro quadri interpretativi centrati prevalentemente sugli aspetti formali, pur costituendo una qualità che la demolizione cancella in modo irreversibile e che la nuova costruzione non è in grado di restituire (Kennedy, Cuddihy and Engel-Yan, 2007; Larkin, 2013).

La convergenza tra preferenze della comunità e modelli internazionali di riuso adattivo è significativa perché conferma la compatibilità tra caratteri

spaziali degli edifici industriali e funzioni culturali, civiche e comunitarie; le ampie superfici, le generose altezze interne e i layout flessibili rendono infatti questi manufatti particolarmente adatti a programmi d'uso collettivo. I risultati dell'indagine inducono inoltre a rivedere criticamente la rappresentazione della 'fabbrica inquinante' adottata per giustificare le politiche di rilocalizzazione: sebbene le preoccupazioni ambientali restino rilevanti il quadro percettivo rilevato ad Hanoi è più articolato e risulta coerente con le evidenze sui benefici per la salute e il benessere associati agli ambienti industriali rigenerati (Fu and Yang, 2026; Gürcanlı et alii, 2024).

In questo contesto l'inclusività va letta come combinazione di accessibilità fisica, accessibilità economica e partecipazione civica: la prima riferita alla prossimità ai trasporti pubblici e alle reti pedonali, la seconda alla possibilità di fruire di attività comunitarie e creative a costi sostenibili, la terza al coinvolgimento degli stakeholder nelle decisioni relative alla programmazione degli usi. A tali dimensioni si affianca il controllo degli effetti immobiliari indotti, da monitorare attraverso le variazioni dei canoni di locazione e le trasformazioni degli usi del suolo nelle aree circostanti.

Il disallineamento tra gli esiti della pianificazione e le preferenze espresse dalla comunità segnala l'esistenza di un ostacolo strutturale, più che un semplice deficit informativo. Nei contesti caratterizzati da una rapida urbanizzazione, le municipalità dipendono spesso in misura significativa dalle entrate derivanti dalla concessione dei suoli, con la conseguenza di produrre incentivi istituzionali che favoriscono sistematicamente la massimizzazione del valore fondiario nel breve periodo a scapito delle istanze culturali e sociali (Grodach and Loukaitou-Sideris, 2007; Yee Sing and Yoh, 2016). Applicata alla scala urbana e all'insieme dei 95 siti questa logica rischia di semplificare in modo irreversibile l'impianto urbano di Hanoi, sostituendo emergenze storicamente stratificate con complessi residenziali e commerciali standardizzati e cancellando quegli spazi accessibili che, una volta perduti, risulteranno difficilmente ricostituibili (Tiesdell, Oc and Heath, 2013).

Gli ostacoli alla diffusione del riuso adattivo non sono soltanto di natura istituzionale. Sul piano economico i costi iniziali connessi alla valutazione del valore culturale, al recupero strutturale e alla bonifica ambientale costituiscono un impegno finanziario che i promotori privati raramente affrontano in assenza di contributi pubblici o incentivi. Sul piano culturale il Patrimonio industriale di epoca socialista incontra difficoltà di legittimazione all'interno dei sistemi correnti di tutela, ancora orientati verso manufatti cui viene attribuito un alto valore architettonico; ciò contribuisce a mantenere molti complessi industriali fuori dai perimetri della protezione formale (TICCIH, 2003).

A ciò si aggiungono barriere normative soprattutto nei casi in cui la legislazione urbanistica non preveda strumenti in grado di accogliere usi misti, culturali e produttivi o modelli come i 'community land trust'. Le barriere partecipative, documentate dall'indagine, riducono inoltre il coinvolgimento civico quando i residenti non dispongono di informazioni adeguate sui programmi di rigenerazione urbana. L'esperienza internazionale mostra tuttavia che esistono traiettorie alternative; la varietà dei modelli di governance riscontrata nei 104 casi analizzati suggerisce infatti che l'esito dei processi di rigenerazione dipende meno dall'entità delle risorse finanziarie disponibili e più dall'orientamento assunto dalla pianificazione, che dovrebbe considerare il Patrimonio industriale dismesso come una risorsa da riattivare, anziché come una passività da rimuovere.

Ambito, trasferibilità e limiti del SAT | Il SAT è stato progettato per il contesto di Hanoi in cui, pur in presenza di disposizioni normative che contemplano usi del suolo di interesse pubblico, i relativi meccanismi di attuazione si rivelano ancora deboli o incompiuti (Nguyen, 2025). La sua logica analitica di fondo che valuta i siti simultaneamente come Patrimonio, infrastrutture spaziali e risultato di governance, risulta particolarmente pertinente nei contesti urbani in cui il suolo industriale all'interno del centro urbano è sottoposto a una forte pressione di rilocalizzazione, le scelte pianificatorie non sono ancora definitivamente consolidate e permane la disponibilità di una base minima di dati spaziali e archivistici. La ponderazione dei criteri è stata intenzionalmente costruita in modo flessibile: la fattibilità della governance tende ad assumere un peso maggiore laddove la capacità pubblica di gestione del suolo risulti debole, mentre i criteri connessi al valore culturale acquistano maggiore rilevanza nei contesti in cui gli strumenti e le competenze per la tutela appaiono più solidi.

Sulla trasferibilità del modello incidono tuttavia almeno due limiti principali: da un lato la prevalenza di casi europei nel corpus comparativo solleva interrogativi circa l'effettiva applicabilità dei relativi modelli di governance ai contesti del Sud-Est asiatico, pertanto, sotto questo profilo, approfondimenti comparativi riferiti a realtà come Shanghai e Penang potrebbero offrire utili elementi di integrazione

Tab. 2 | Formation periods and heritage value (credit: EUNIC-HAU, 2022).

Period	No. of industrial facilities	Heritage value assessment
Pre-1954 (French colonial)	18	Highest architectural distinction; priority for protection
1954-1986 (Socialist era)	36	Material witnesses to the subsidy-era economy; high socio-historical significance
Post-1986	28	Mixed; assessed primarily on spatial an innovation potential
Undated	11	Require further archival investigation

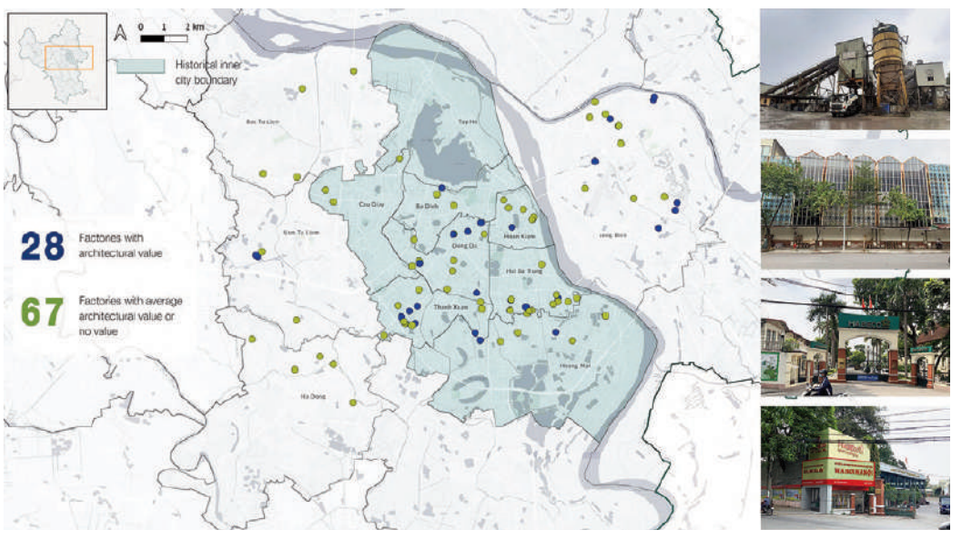


Fig. 4 | Quality of architecture of industrial production facilities (credit: EUNIC-HAU, 2022).



Figg. 5-8 | Exterior and interior views of the Gia Lam Railway Works, Hanoi: spatial qualities supporting adaptive reuse potential (credit: the Author, 2022).

e verifica (Sun and Chen, 2023; Yee Sing and Yoh, 2016); dall'altro l'assenza di un coinvolgimento diretto della politica riduce la possibilità di sviluppare un'analisi istituzionale pienamente articolata. In tale prospettiva una sperimentazione pilota condotta con le autorità locali competenti in materia di pianificazione si configura come il passaggio successivo più appropriato ai fini della validazione operativa del modello proposto.

Implicazioni per gli Obiettivi di Sviluppo Sostenibile | La ricerca contribuisce anzitutto all'SDG 9 (Industria, innovazione e infrastrutture) nella misura in cui riconfigura il Patrimonio industriale come infrastruttura urbana per l'innovazione, idonea ad accogliere funzioni legate alla produzione culturale, alle industrie creative e alle 'economie della conoscenza'. Un rilievo altrettanto significativo assume l'SDG 10 (Ridurre le disuguaglianze): il divario strutturale emerso, tra le previsioni d'uso degli strumenti di pianificazione e gli orientamenti espressi dalla comunità locale, restituisce infatti un orientamento istituzionale che tende a escludere in modo sistematico i gruppi sociali a minore capacità economica dai benefici prodotti dai processi di rigenerazione urbana; il SAT interviene su questo aspetto mediante indicatori riferiti alla quota di superfici destinata a usi non commerciali, al grado di capacità incisiva dei processi partecipativi e al monitoraggio del rischio di spostamento residenziale indotto (Ricci, Poli and Marino, 2025). Il contributo si collega inoltre all'SDG 11 (Città e comunità sostenibili) poiché riconduce la tutela del Patrimonio e la riattivazione di spazi interni alla città, oggi sottoutilizzati, all'interno di una prospettiva di infrastrutturazione urbana inclusiva.

Le sinergie indirette si estendono a un quadro più ampio dell'Agenda 2030: l'SDG 8 (Lavoro dignitoso e crescita economica) è intercettato attraverso le ricadute generate dalle industrie creative e dalle attività di turismo culturale; l'SDG 3 (Salute e benessere) attraverso i benefici connessi alla disponibilità di spazi verdi pubblici accessibili all'interno di complessi industriali rigenerati; l'SDG 4 (Istruzione di qualità) mediante scenari di riuso orientati ad attività educative e formative; l'SDG 12 (Consumo e produzione responsabili) tramite strategie di riuso dei materiali e di decostruzione capaci di ridurre il carbonio incorporato (embodied carbon), come promosso dagli studi di Baiani et alii (2024); infine, gli SDG 13 (Lotta contro il cambiamento climatico) e 16 (Pace, giustizia e istituzioni solide) sono richiamati, rispettivamente, dal minore ricorso a cicli di demolizione e ricostruzione e dall'esigenza

di una governance inclusiva nelle decisioni relative agli usi del suolo.

Accanto a tali sinergie il quadro evidenzia due profili di criticità che devono essere esplicitamente considerati: 1) la rigenerazione fondata sulla valorizzazione del Patrimonio può favorire processi di gentrificazione e di spostamento residenziale delle fasce sociali a minore capacità di spesa, qualora la pressione immobiliare non sia compensata da misure per l'abitare accessibile o da quote di spazio riservate a usi collettivi; 2) la rigenerazione dei siti industriali può entrare in tensione con l'SDG 13 quando la programmazione di funzioni commerciali determina un incremento della domanda energetica e della produzione di rifiuti in assenza di adeguate misure di mitigazione. L'SDG 17 (Partnership per gli obiettivi) emerge infine nello sfondo collaborativo internazionale della rete di ricerca EUNIC, pur configurandosi, all'interno dello studio, come dimensione contestuale più che come asse analitico centrale.

Conclusioni | Questo studio ha esaminato il potenziale di riuso adattivo di 95 siti industriali interni alla città inclusi nel programma di rilocalizzazione di Hanoi, attraverso un quadro in quattro fasi e metodi misti che combinano mappatura GIS, analisi morfologica, indagine sulla comunità e analisi comparativa di 104 casi internazionali. Sono state affrontate due domande di ricerca: se i siti industriali relativamente recenti delle città a industrializzazione tardiva possano essere riconosciuti come patrimonio e quali modelli internazionali di riconversione offrano insegnamenti trasferibili.

Entrambe le domande ricevono risposta positiva sulla base di evidenze empiriche. I 95 siti possiedono un significativo valore culturale e spaziale, nonostante siano realizzazioni recenti: 28 siti presentano un notevole valore storico e architettonico, mentre il campione nel suo complesso mette in luce qualità che sostengono il riuso adattivo in un'ampia gamma di programmi funzionali. Il confronto internazionale conferma che il riuso con programmi di natura culturale, i modelli di governance ibrida e la programmazione flessibile a supporto delle industrie creative e delle attività comunitarie ricorrono come tratti distintivi dei riusi adattivi di successo in differenti contesti di governance e di investimento. Tali evidenze convergono con i risultati dell'indagine condotta ad Hanoi, dove il 55% degli intervistati privilegia le funzioni culturali e pubbliche, a fronte di meno dell'1% di destinazioni culturali previste nella programmazione vigente.

Lo studio fornisce tre contributi. Sul piano empirico documenta un divario strutturale tra le allocazioni di Piano, le preferenze della comunità e i casi studio internazionali che non può essere spiegato soltanto in termini di deficit informativo, ma riflette la logica istituzionale della dipendenza dalle rendite fondiarie nelle città in rapida urbanizzazione. Sul piano teorico individua una 'distorsione post-industriale' nei principali metodi di valutazione del valore culturale e riformula il Patrimonio industriale come infrastruttura urbana orientata all'innovazione, il cui valore risiede sia nella dotazione di spazi e strutture di qualità spaziale sia nella memoria socio-storica. Sul piano metodologico propone un SAT che traduce evidenze provenienti da più fonti in un quadro strutturato di supporto alle decisioni, calibrato sulle condizioni istituzionali di Hanoi, ma adattabile anche ad altri contesti in cui il suolo industriale del centro urbano è sottoposto a una forte pressione per la rilocalizzazione.

Tra i limiti dello studio si segnalano la prevalenza di casi europei nella banca dati internazionale e l'assenza di un coinvolgimento diretto dei decisori politici. Le ricerche future dovrebbero estendere l'analisi comparativa alle città del Sud-Est e dell'Est asiatico e promuovere una sperimentazione pilota del SAT con le Autorità di Piano, così da verificarne l'utilità operativa. Le dimensioni di genere del Patrimonio industriale, ampiamente assenti in questo studio, rappresentano un'ulteriore promettente direzione di indagine.

Più in generale la complessità che caratterizza la rigenerazione del Patrimonio industriale – anche in relazione ai rischi combinati derivanti dal cambiamento climatico, dai processi di degrado materiale e dalle condizioni di fragilità ambientale – richiede approcci multidisciplinari che oltrepassino impostazioni conservative di tipo lineare e assumano la valutazione previsionale del rischio come componente integrata, articolata su più scale temporali e territoriali (Biasi et alii, 2024).

L'esperienza di Hanoi illustra una sfida più ampia che interessa le città in rapida urbanizzazione delle regioni a industrializzazione tardiva: le politiche di rilocalizzazione, guidate da obiettivi ambientali e di ottimizzazione fondiaria, rischiano di precludere in modo permanente il valore culturale, spaziale, architettonico e sociale incorporato nel tessuto industriale della città. Il riuso adattivo offre un'alternativa praticabile, non soltanto come misura di conservazione, ma anche come strategia per costruire, a partire da risorse urbane esistenti, infrastrutture urbane inclusive e capaci di innovazione.

Rapid urbanisation in Asia has produced a paradox: cities enter a post-industrial phase while industrialisation remains ongoing, generating a growing stock of underused inner-city industrial sites as new zones expand at the periphery (Fan and

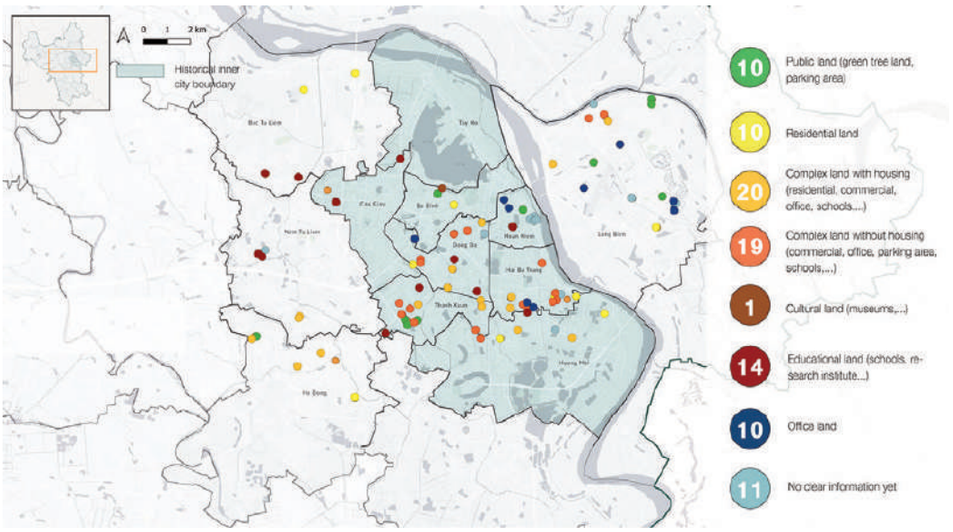


Fig. 9 | Orientation for transformation in terms of functionality of industrial production facilities in the relocation list (credit: EUNIC-HAU, 2022).

Conversion orientation	Planning orientation	Community preferences	International conversion models
Cultural	1%	55%	55%
Public / green space	11%	22%	10%
Educational and training	15%	15%	4%
Mixed-use (non-residential)	2%	5%	21%
Residential and commercial uses	53%	3%	10%

Tab. 3 | Conversion orientations: three-way comparison (credit: EUNIC-HAU, 2022).

No.	Project Name	Country	Year	Original Function	Post-conversion Function	Conversion Model	Financial Scheme	Selection Criteria	Key Value Generated
1	Les Abattoirs Museum	France	2000	Slaughterhouse	Art museum	Public cultural reuse	Public funding	Heritage value + urban regeneration	Cultural regeneration
2	La Friche Belle-de-Mai	France	1992-ongoing	Tobacco factory	Creative complex	Hybrid governance	Public–community partnership	Scale + multi-functionality	Creative economy
3	NOD Makerspace	Romania	2015	Cotton factory	Makerspace	Entrepreneurial reuse	Private / mixed	Innovation potential	Creative production
4	La Escocesa	Spain	2010s	Textile factory	Art production space	Artist-led reuse	Public support + cooperative	Cultural ecosystem	Artistic community
5	Foundries Garden	France	2010s	Industrial warehouse	Public landscape	Landscape reuse	Public funding	Spatial integration	Social / environmental value
6	MACRO Museum	Italy	2002	Brewery	Art museum	Institutional reuse	Public investment	Cultural repositioning	Urban branding
7	ENSA Normandie	France	1980s-2000s	Textile factory	Architecture school	Educational reuse	Public funding	Functional adaptability	Knowledge infrastructure
8	Gasometer Oberhausen	Germany	1990s	Gas storage	Exhibition space	Landmark reuse	Public–private partnership	Iconic character and scale	Tourism / identity
9	Carrières de Lumières	France	2012	Quarry	Digital art centre	Experiential reuse	Private operator	Experiential value	Immersive culture
10	Contemporary Museum Models	Global	2010s-ongoing	—	Hybrid museum formats	Innovation-driven	Mixed funding	Transferability	Audience engagement

Tab. 4 | Descriptive characteristics of selected international industrial heritage conversion cases (credit: the Author, 2026).

No.	Project Name	Strengths	Limitations	Issues	Degree of transferability to Hanoi
1	Les Abattoirs Museum	Strong institutional backing; monumental heritage preserved; wide audience reach	High public expenditure required	Interior fully redesigned, reducing authenticity of industrial fabric	HIGH | Model for mid-size heritage buildings requiring institutional governance and cultural programming
2	La Friche Belle-de-Mai	Community co-ownership; 70 resident organisations; 450,000 visitors per year; flexible evolving programme	Complex governance; high maintenance costs	SCIC legal structure context-specific to France; not directly transposable	HIGH | Relevant for large complexes (e.g. Gia Lâm railway works); cooperative logic adaptable to multi-stakeholder contexts in Hanoi
3	NOD Makerspace	Low-cost replication (€120,000 initial); preserves industrial spatial character; supports innovation ecosystem	Small scale limits broader urban impact	Sustainability depends on continued demand for creative workspaces	HIGH | Scalable model for smaller Hanoi sites (<0.3 ha); low-cost entry point for innovation-oriented reuse
4	La Escocesa	Preserves industrial fabric; strong community-artist governance; international residency exchanges	Dependent on sustained municipal funding	Programme scope limited to arts sector; limited economic diversification	HIGH | Model for mid-scale factories with public-interest mandate; relevant to Hanoi's cultural facilities deficit
5	Foundries Garden	Industrial traces integrated rather than museified; covered garden creates unique microclimate; district-wide impact	Large investment requires strong municipal capacity	Long-term ecological maintenance of the covered vegetation complex	MEDIUM-HIGH | Model for open-space conversion; relevant to Hanoi sites adjacent to green corridors
6	MACRO Museum	High architectural quality; three structures unified into coherent complex; strong urban integration	High investment for expansion phase	Primarily public-funded with limited community co-governance	MEDIUM | Applicable to Hanoi factories with notable heritage and architectural status
7	ENSA Normandie	Structural system preserved (iron posts, wooden beams); educational use aligns with spatial qualities	Institutional dependency limits programmatic flexibility	Floor area standards specific to higher education; not easily adapted to other uses	MEDIUM | Relevant to Hanoi given HAU mandate and proximity to industrial sites; model for educational reuse
8	Gasometer Oberhausen	Unique spatial experience; 8 million visitors to date; landmark on the European Route of Industrial Heritage (ERIH)	Highly specialised typology limits functional diversity	Dependent on high-volume visitor programming for financial sustainability	MEDIUM | Informs SAT innovation capacity criteria; applicable to exceptional Hanoi structures (e.g. water towers, silos)
9	Carrières de Lumières	Innovative immersive programming (100 projectors, 6,000 m² projection surface); transforms spatial constraint into asset	Site-specific conditions not replicable	Programming dependent on the private operator's commercial model	MEDIUM | Informs experiential programming strategies for Hanoi sites with distinctive spatial character
10	Contemporary Museum Models	Demonstrates potential of digital / immersive tools to expand audience engagement across diverse spatial contexts	Not a single project; no single governance or financial model	Highly context-dependent; requires significant technical investment	MEDIUM | Informs innovation capacity and programming strategies across multiple Hanoi conversion scenarios

Tab. 5 | Evaluation and transferability of selected international industrial heritage conversion cases (credit: the Author, 2026).

Scott, 2003; Yee Sing and Yoh, 2016; Yusuf and Nabeshima, 2005; Zhang, 2007). In Hanoi, Vietnam, the mandated relocation of 95 inner-city industrial facilities to the urban fringe driven by environmental, traffic, and land-optimisation objectives is treated primarily as a technical planning issue, leaving the heritage and spatial value of vacated sites largely unaddressed and causing cleared land to default to real estate redevelopment.

Dominant industrial heritage frameworks, including the Nizhny Tagil Charter (TICCIH, 2003) and the Dublin Principles (ICOMOS and TICCIH, 2011; Plevoets and Van Cleempoel, 2019; Arbab and Alborzi, 2022) emerged primarily from Western European contexts where industrialisation had largely concluded before preservation debates developed. This historical trajectory shapes what this paper terms a post-industrial bias: heritage frameworks that prioritise the conservation of completed industrial histories rather than the adaptive transformation of still-active industrial landscapes. In cities such as Hanoi, where industrialisation and post-industrial transformation occur simultaneously, vacated sites are not only historical artefacts but spatial infrastructures whose embedded capacities remain available for reactivation (Kennedy, Cuddihy and Engel-Yan, 2007; Larkin, 2013; Barles, 2010).

Such sites can therefore support new forms of production, cultural activities, and social infrastructure rather than functioning solely as objects of conservation. Recent scholarship has further expanded this framing by exploring disused industrial sites as strategic resources for energy and circular transition, demonstrating how adaptive reuse interventions can activate new material, energy, and water cycles that extend beyond the building to the surrounding urban territory (Baiani et alii, 2024).

Recent research further highlights the need for integrative methodological frameworks capable of balancing conservation principles, sustainability objectives, and urban development requirements in heritage regeneration projects (Sorbo et alii, 2025). At the same time, scholars increasingly emphasise the role of community-oriented regeneration strategies in strengthening the social value of heritage sites and expanding civic engagement in adaptive reuse processes (Mehan, 2025). These perspectives suggest that industrial heritage regeneration should be understood not only as a conservation challenge but also as a broader question of urban infrastructure and governance.

Recent bibliometric research confirms persistent gaps: the dominance of European case studies, the absence of integrative frameworks linking industrial heritage to urban innovation, and insufficient translation of research into policy decision-support tools (Çeltekligil and Arabacıoglu, 2025; Szopinska-Mularz et alii, 2025). Addressing these gaps, this study examines Hanoi's industrial heritage as innovation-oriented urban infrastructure contributing to SDG 9, developing a Strategic Assessment Toolkit (SAT) through a mixed-methods approach combining spatial analysis, architectural investigation, social survey, and international case comparison (UNESCO, 2023). Two research questions are addressed: 1) can industrial facilities in late-industrialising cities such as Hanoi be recognised as heritage despite their relatively recent age? and 2) what patterns from international conversion models offer transferable lessons?

This paper makes three contributions: theoretically, it introduces the concept of 'post-industrial bias' to explain why dominant heritage frameworks systematically undervalue industrial sites in late-industrialising cities; methodologically, it proposes the Strategic Assessment Toolkit (SAT), a five-criterion decision-support framework replicable beyond the Hanoi context; empirically, it draws on an original mixed-methods dataset encompassing 95 industrial facilities, 1,040 community survey responses, and 104 international conversion cases. The paper is organised as follows: research methodology, the results of the Hanoi investigation, international case analysis, SAT framework, theoretical discussion, and conclusions addressing transferability and policy implications. The findings are of potential interest to researchers, planners, and heritage practitioners working in rapidly urbanising contexts where conservation and active industrial transformation occur simultaneously.

Research methodology | This study adopts a mixed-methods, multi-scalar approach, examining industrial facilities simultaneously as architectural structures, spatial components of the urban fabric, and institutional entities within planning and governance systems (Creswell and Plano Clark, 2018; Yin, 2018; Meng, Zhi and Pang, 2023; UNESCO, 2023). The empirical dataset was developed within the EUNIC project 'Repurposing Industrial Heritage' (2021-2022) and structured into four complementary phases. Similar integrative research approaches have increasingly been used in heritage and urban regeneration studies to address the complex interaction between spatial, cultural, and socio-economic dimensions of historic sites (Mehan, 2025).

Phase 1, dedicated to spatial mapping and analysis of the urban structure, involved a GIS investigation of 95 industrial sites included in the relocation measure issued by the Prime Minister's decision (Nguyen, 2025). Four variables were mapped for each industrial facility: position within the centre-periphery structure, plot size and building coverage ratio, transport connectivity, and spatial relationship to surrounding public spaces and community infrastructure. These variables were selected to assess each site's potential for integration into the surrounding urban fabric through adaptive reuse, reflecting broader discussions on the role of spatial structure and public space in contemporary urban regeneration processes (Berretta, Desideri and Staltari, 2024).

Phase 2, dedicated to archival research and the analysis of architectural morphology, involved the assessment of the heritage value of 95 sites through an interpretative framework developed by the EUNIC-HAU research group and based on evaluation approaches already established in the literature and sector practice (TICCIH, 2003; Plevoets and Van Cleempoel, 2019; Djebbour and Biara, 2020; Sorbo et alii, 2025). Each facility was examined through four domains: general information, heritage values, current planning status, and stakeholder context (Fig. 1). Of the 95 facilities, 28 were identified as having significant heritage value; ten were selected for detailed investigation based on spatial integration potential, historical significance, and architectural characteristics.

Phase 3, the survey on community perceptions, was conducted between 6 and 20 October 2021 through an online questionnaire, extended to the urban scale, aimed at capturing opinions on relocation and potential reuse scenarios for industrial sites. A total of 1,040 responses were collected from three main stakeholder groups: 1) factory-related actors such as owners, managers, and workers; 2) residents living near the relocation-listed facilities; and 3) broader stakeholders involved in urban development and heritage processes, including local authorities, urban planners, architects, experts, and potential users of regenerated spaces.

The survey combined closed-ended questions on policy awareness, perceived impacts, and redevelopment preferences with open-ended questions on attitudes toward industrial heritage and adaptive reuse. Considering stakeholder perspectives is increasingly recognised as a key dimension in evaluating regeneration strategies and inclusive heritage governance.

Phase 4, dedicated to comparison with international cases, aimed to identify regeneration schemes transferable to the Hanoi context. For this purpose, a database was created with 104 international projects for the adaptive reuse of industrial heritage, developed through the contribution of 11 partner institutions and supplemented by targeted documentary research activities. Cases were selected through purposive sampling based on criteria ensuring comparability with Hanoi's industrial facilities.

The main criteria included: completeness of documentation (plans, sections, and spatial information), preservation of the original industrial structures, urban location, construction periods broadly comparable to Hanoi's industrial sites (1890-1960), and industrial typologies similar to those historically present in the city (e.g. breweries, railway workshops, electrical engineering plants, tobacco, textile, and light manufacturing facilities). Both large factory complexes (5,000-60,000 m^2) and smaller projects demonstrating effective regeneration strategies were included.

The cases were analysed according to governance models, financing mechanisms, functional programmes, and implementation processes, reflecting approaches commonly used in comparative studies of post-industrial landscape regeneration (Mehan, 2025).

Data integration and limitations | Findings from the four phases were synthesised through a multi-criteria analytical framework combining spatial, architectural, social, and international evidence, forming the empirical basis for the SAT. Similar multi-criteria frameworks have recently been proposed to support decision-making processes in heritage regeneration and adaptive reuse projects (Sorbo et alii, 2025).

Three limitations should be noted: first, the international case database may reflect a geographical bias toward European examples due to its reliance on the EUNIC network; second, governance feasibility assessments rely primarily on secondary sources, as direct interviews with policy-makers were outside the scope of the project; third, this study does not address the gender dimension of industrial heritage history in Hanoi, an emerging area of inquiry in international scholarship on the built heritage (Garda et alii, 2025), and future research may benefit from incorporating this perspective into heritage assessment frameworks.

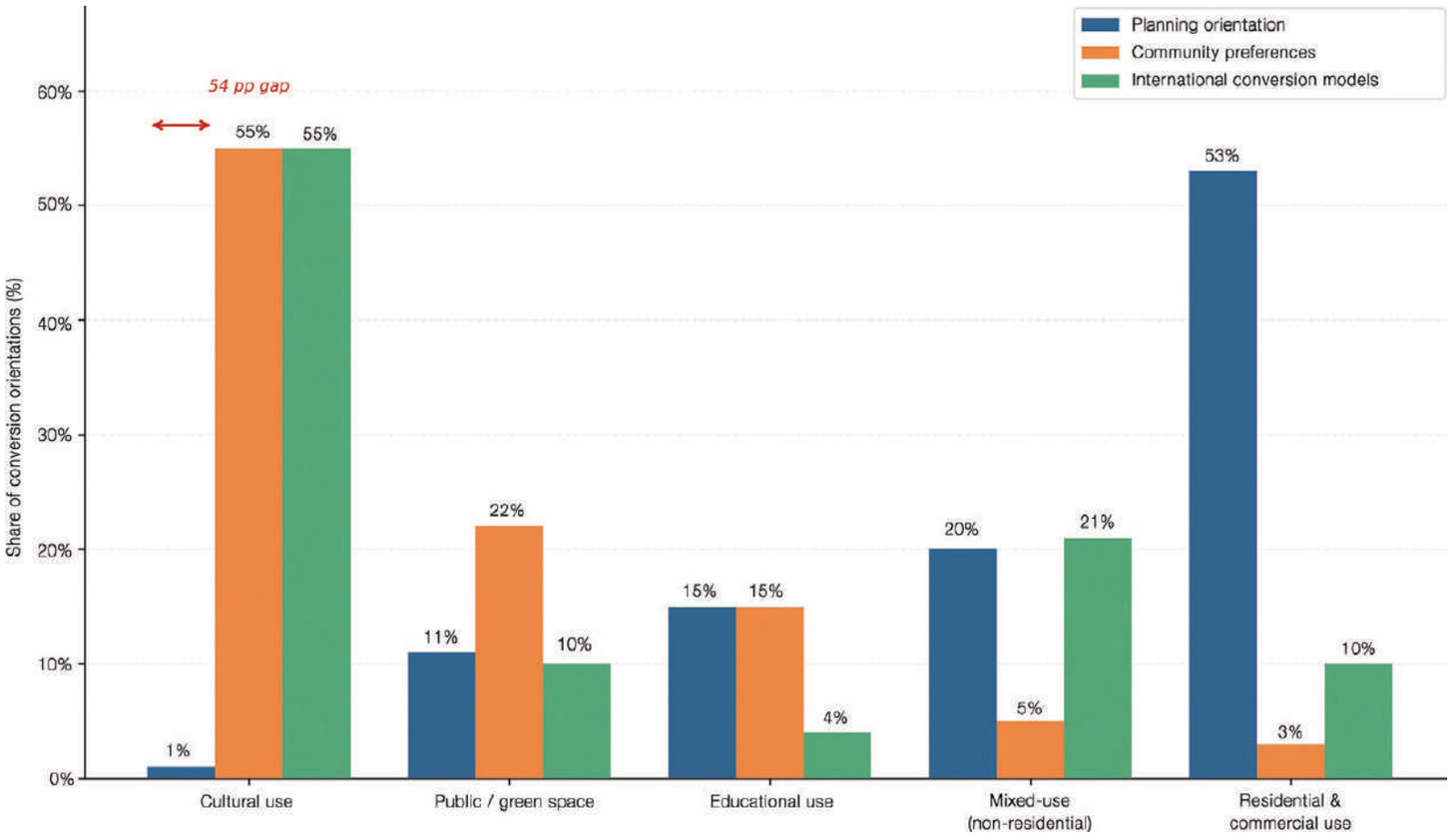


Fig. 10 | Conversion orientations: planning, community preferences, and international models (credit: EUNIC-HAU, 2022).

The results of the investigation into the industrial sites of Hanoi | Spatial analysis of the 95 industrial facilities challenges the core assumption (Kennedy, Cuddihy and Engel-Yan, 2007; Barles, 2010) embedded in the technical framing of relocation policy that these sites are peripheral or residual elements of the urban structure. The vast majority are located within or immediately adjacent to the urban belt consolidated during the socialist industrialisation period (c. 1960-1980), and have since been absorbed into the city's dense inner fabric. The five leading districts[1] – Long Bien, Hai Ba Trung, Dong Da, Thanh Xuan, and Hoang Mai – together account for 69 of the 95 industrial facilities (Tab. 1). Plot sizes range from under 0.3 ha (27 sites, suited to makerspaces and workshops) to over 5 ha (9 sites), including the Gia Lam Railway Works (~20 ha), the largest single opportunity in the dataset (Fig. 2). Across all scales, shared structural features, including open floor plates of 500 m^2 or more, ceiling heights of 6-12 m, robust concrete or steel frames, and wide courtyards provide precisely the spatial qualities that demolition-led clearance would permanently eliminate.

Of the 95 industrial facilities, 82 can be assigned to one of three formation periods based on available archival records. The remaining 11 could not be dated from accessible documentation (Fig. 3). Of the 95 industrial facilities assessed, 28 carry significant heritage value meriting priority protection (Tab. 2; Fig. 4). The 1954-1986 cohort is of particular significance: as material witnesses to the subsidy-era economy, these buildings embody layers of collective labour memory that conventional architectural assessment criteria calibrated primarily to recognise formal distinction systematically fail to capture (Figg. 5-8). The Hanoi Plan documents assign different land uses to the 95 sites scheduled for relocation as follows: 20 sites are designated for mixed-use with residential functions, 19 for mixed-use without residential functions, 14 for education and training, 10 for public space or green areas, 10 for office land, 10 for residential use, 1 for cultural use, and 11 sites have no clearly defined land-use orientation (Fig. 9). Cross-referencing these orientations with the community survey and the international dataset reveals a three-way structural gap (Tab. 3).

The most striking finding is the near-complete absence of cultural programming in Hanoi's planning framework: just 1% of sites, against 55% in both community preferences and successful international conversions. This gap reflects the structural subordination of cultural and heritage values to land-revenue maximisation logic in contexts where municipal governments depend heavily on land lease income (Grodach and Loukaitou-Sideris, 2007; Yee Sing and Yoh, 2016). The survey further reveals a significant information deficit (Lee, Song and Ducruet, 2008): 56.1% of residents held clear opinions on relocation yet only 49% had access to basic details about plans for nearby facilities. Impact perceptions also complicate the standard 'polluting factory' narrative: 38.2% reported no significant impact and 8.1% reported positive effects, against 29.7% reporting negative ones (Fig. 10).

International case studies of adaptive reuse | Analysis of the 104 international cases (Fig. 11) reveals a functional pattern dominated by cultural programming: 55% were converted into cultural facilities, 21% into non-residential mixed-use complexes, 10% into public spaces, and 93% involved full functional conversion. This confirms that adaptive reuse internationally favours cultural and public functions over commercial redevelopment (Grodach and Loukaitou-Sideris, 2007; Sun and Chen, 2023). Ten projects were selected for closer examination, representing diverse models of industrial heritage conversion. Their descriptive characteristics and comparative evaluation are synthesised in Tables 4 and 5. The selected cases encompass a range of transformation approaches, from cultural reuse and creative industry development to landscape integration and landmark-driven regeneration, which are systematically analysed through three analytical categories: management models, functionality models, and breakthrough ideas. Les Abattoirs Museum (Toulouse) and La Friche Belle-de-Mai (Marseille) illustrate contrasting yet equally sustainable governance configurations (Andres and Grésillon, 2011; Grésillon, 2011); Nod Makerspace (Bucharest) demonstrates that innovation-oriented conversion is achievable with limited capital (Romanelli and Zbuchea, 2020); and Gasometer Oberhausen and Carrières de Lumières (Les Baux-de-Provence) show how immersive programming can substantially expand community engagement (López-Bravo, Lonardo and Rosado, 2020; Gürcanlı et alii, 2024). Together, the cases analysed suggest that the effectiveness of adaptive reuse depends less on a single governance configuration than on the coherence between the management model, the available investment

and the functional programme (Moldoveanu and Franc, 2014; Putilov and Bazilevich, 2021).

Strategic Assessment Toolkit (SAT) | The empirical findings were synthesised into a SAT designed to support decision-making in the regeneration of industrial heritage sites in Hanoi. The toolkit integrates evidence from the four research phases – spatial mapping, architectural analysis, community survey, and international case comparison – into a structured framework for evaluating the adaptive reuse potential of industrial facilities. Similar multi-criteria evaluation approaches have increasingly been adopted in heritage planning to support decision-making processes in complex regeneration contexts (Cellucci, Revellini and Tatano, 2025; Sorbo et alii, 2025). Rather than operating as a rigid classification system, the SAT functions as a multicriteria decision-support device. Based on the 104 international cases, it organises the indicators into five key dimensions (Tab. 6), which are understood as weighted decision-making factors adaptable to local institutional and financial conditions (Fig. 12).

The first criterion group, 'spatial and urban integration', evaluates the physical relationship between industrial facilities and the surrounding urban structure through three indicators: inner-city location within Hanoi's consolidated urban fabric, transport connectivity measured by walking distance to the nearest public transport stop, and spatial permeability reflecting each site's capacity for integration with adjacent public spaces. GIS analysis confirms that the majority of the 95 industrial facilities occupy strategically integrated positions, suggesting strong potential for adaptive reuse as components of the city's public and cultural infrastructure (Berretta, Desideri and Staltari, 2024). The design of open, permeable, and accessible public spaces as connective infrastructure between former industrial sites and surrounding urban fabric aligns with broader principles for sustainable urban liveability, in which spatial integration, pedestrian accessibility, and community engagement are recognised as interdependent determinants of successful adaptive transformation (Lanini et alii, 2025).

The second criterion group, 'heritage value', is assessed through indicators including historical significance, architectural characteristics, spatial configuration, and socio-historical memory associated with industrial production and labour history. This broader interpretation reflects recent scholarship emphasising the need to consider both tangible and intangible dimensions of industrial heritage in regeneration processes (Sorbo et alii, 2025).

The third criterion group, 'governance and economic feasibility', examines management structures, financing mechanisms, and compatibility with existing legal frameworks. Comparative analysis of the 104 international cases demonstrates that successful regeneration projects rarely rely on a single governance model; instead, they depend on the capacity to combine institutional authority with private investment and active community involvement. This multi-stakeholder logic in which public agencies set the regulatory framework while civil society and private actors contribute resources and programming has been identified as a recurrent condition for long-term regeneration viability (UNESCO, 2011; Cellucci, Revellini and Tatano, 2025). Feasibility assessment within the SAT therefore evaluates not only financial viability but also the degree to which a proposed governance arrangement can sustain inclusive use over time.

The fourth criterion group, 'innovation capacity', enables former industrial sites to function as innovation-oriented urban infrastructure, contributing to knowledge-based economic development and aligning with SDG 9. The tourism and cultural activation potential of repurposed industrial infrastructure has been further confirmed through parameter-based analysis of refurbishment projects across diverse governance contexts (López-Bra-

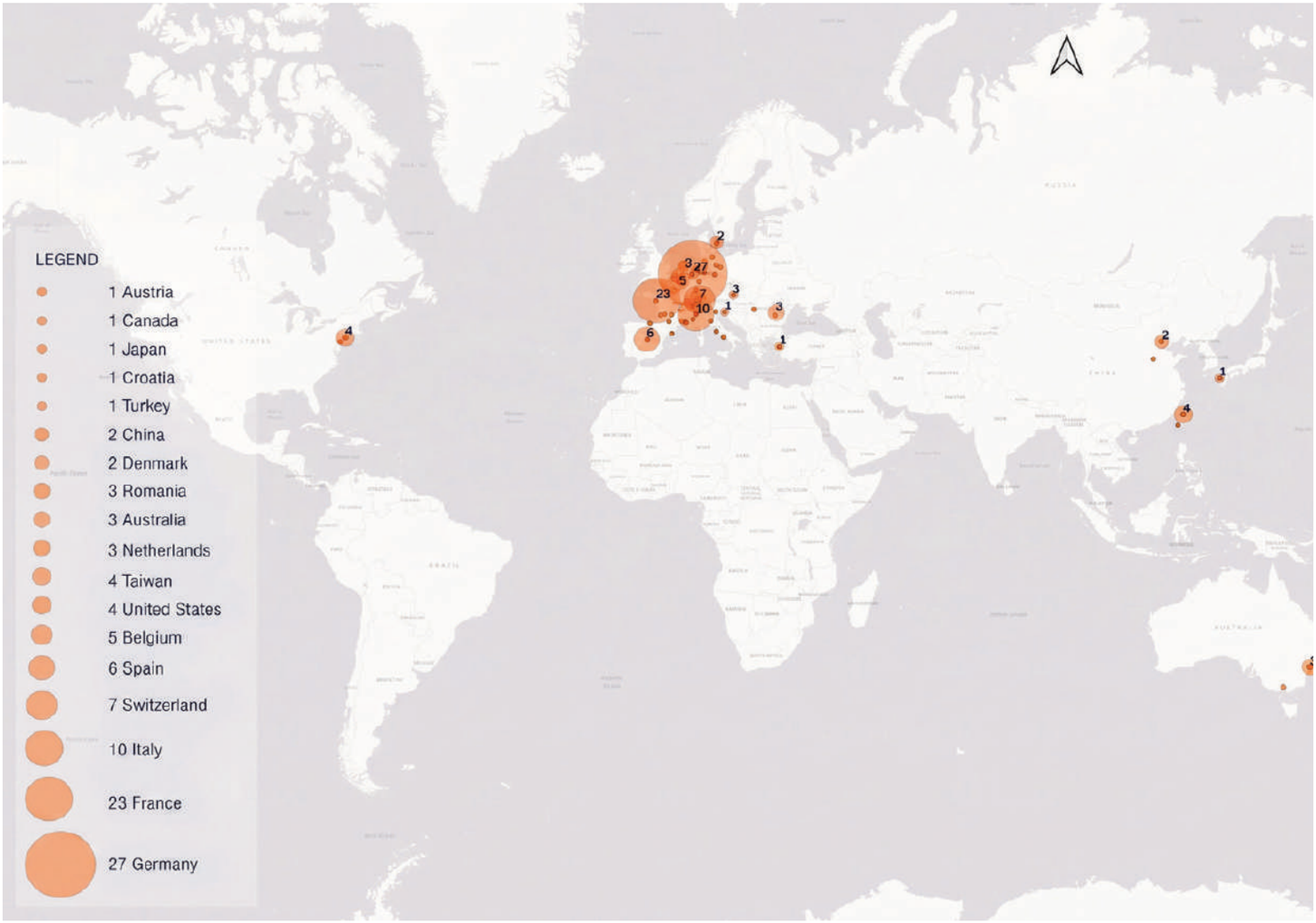


Fig. 11 | Geographic distribution of 104 industrial heritage conversion models worldwide (credit: EUNIC-HAU, 2022).

SAT dimension	Criterion group	Key indicators	Empirical grounding
Lessons learned	1. Spatial and urban integration	Inner-city position; transport connectivity; permeability potential	Phase 1 | GIS mapping of 95 facilities
Lessons learned	2. Heritage value	Historical significance; architectural quality; morphological coherence; socio-historical memory	Phase 2 | 28 of 95 facilities identified as having heritage value
Management models	3. Governance and economic feasibility	Management model; financing pathway; legal framework compatibility	Phases 3 and 4 | survey and international case comparison
Functional models	4. Innovation capacity	Creative industry suitability; programmatic flexibility; knowledge infrastructure potential	Phase 4 | 104 international models
Functional models + innovative features	5. Social inclusion	Community accessibility; cultural and social benefit; civic participation	Phase 3 | Survey (n = 1,040)

Tab. 6 | Structure and criteria of the SAT (credit: EUNIC-HAU, 2022; adapted by the Author).

vo, Lonardo and Rosado, 2020; Mehan, 2025). The fifth criterion group, 'social inclusion', addresses the consultation gap identified in the community survey by incorporating three measurable indicators: the percentage of proposed floor area allocated to non-commercial, community-accessible uses; the depth of stakeholder involvement in programming decisions (ranging from post-decision notification to co-design); and displacement risk, assessed through anticipated changes in surrounding land and rental values relative to the city-wide average. This dimension makes it possible to connect the public interest in cultural and civic functions, recorded through the 1,040 questionnaires, with the need for governance devices capable of monitoring the redistributive effects of regeneration (Cellucci, Revellini and Tatano, 2025; Ricci, Poli and Marino, 2025). Together, these five dimensions form an integrated framework that links spatial, heritage, governance, innovation, and social considerations. The SAT therefore provides a structured basis for comparing regeneration options and for identifying strategies that balance heritage preservation with urban development objectives.

Reformulating the industrial heritage: from object of preservation to inclusive urban infrastructure | The findings challenge dominant industrial heritage frameworks rather than merely demonstrating their limited applicability. The Nizhny Tagil Charter and the Dublin Principles emerged in contexts where industrialisation had largely concluded before preservation debates developed. What this study terms post-industrial bias arises when these frameworks are transferred to cities where industrialisation and post-industrial transformation occur simultaneously, producing non-neutral outcomes: facilities from the 1954-1986 socialist period are systematically disadvantaged within existing heritage evaluation systems that privilege architectural exceptionalism over socio-historical significance.

This bias operates at two levels. First, existing criteria undervalue the socialist industrial cohort, whose significance lies in labour memory and the spatial identity of the subsidy-era economy. Second, the spatial qualities of these buildings – large floor plates, structural robustness, and courtyard configurations – remain largely invisible within form-oriented frameworks, yet represent embedded spatial capacity that demolition permanently eliminates and new construction cannot reproduce (Kennedy, Cuddihy and Engel-Yan, 2007; Larkin, 2013). The convergence between community preferences and international models of adaptive reuse is significant because it confirms the compatibility between the spatial characteristics of industrial buildings and cultural, civic and community functions. Their large floor areas, generous internal heights and flexible layouts make these structures particularly suited to collective programmes of use. The survey findings also call for a critical reassessment of the representation of the 'polluting factory' used to justify relocation policies: although environmental concerns remain relevant, the perceptual framework recorded in Hanoi is more nuanced and is consistent with evidence on the health and well-being benefits associated with regenerated industrial environments (Fu and Yang, 2026; Gürcanlı et alii, 2024).

In this context, inclusiveness should be understood as a combination of physical accessibility, economic accessibility and civic participation: the first refers to proximity to public transport and pedestrian networks; the second to the possibility of accessing community and creative activities at affordable costs; and the third to stakeholder involvement in decisions concerning the programming of uses. These dimensions are complemented by the need to control induced property effects, to be monitored through changes in rental values and transformations in land use in the surrounding areas.

The discrepancy between planning outcomes and community preferences – 1% versus 55% allocated to cultural functions – reflects a structural barrier rather than an informational gap. Municipal governments in rapidly urbanising cities often depend heavily on land-lease revenues, creating institutional incentives that systematically favour short-term land-value maximisation over cultural and social considerations (Grodach and Loukaitou-Sideris, 2007; Yee Sing and Yoh, 2016). At the urban scale, applying this logic across 95 facilities risks permanently simplifying Hanoi's spatial structure by replacing historically layered environments with homogeneous residential-commercial complexes that eliminate the affordable spaces difficult to reproduce once lost (Tiesdell, Oc and Heath, 2013). The barriers to the wider adoption of adaptive reuse are not solely institutional. At the economic level, the initial costs associated with the assessment of cultural value, structural rehabilitation and environmental remediation represent a financial commitment that private developers rarely undertake without public funding or incentives. At the cultural level, industrial heritage from the socialist period still struggles to gain legitimacy within current protection systems, which remain oriented towards artefacts attributed with high architectural value; this contributes to keeping many industrial complexes outside the boundaries of formal protection (TICCIH, 2003).

These are compounded by regulatory barriers, especially where planning legislation does not provide instruments capable of accommodating mixed, cultural and productive uses, or models such as 'community land trusts'. Participatory barriers, as documented by the survey, also reduce civic engagement when residents lack adequate information on urban regeneration programmes.

International experience demonstrates that alternative trajectories are feasible. The diversity of governance models across the 104 cases suggests that successful regeneration depends less on financial scale than on planning orientation: treating industrial heritage as an asset to be activated rather than a liability to be cleared.

Scope, transferability, and limits of the SAT | The SAT was designed for Hanoi's governance context, where legal provisions for public-interest land uses exist but implementation mechanisms remain limited (Nguyen, 2025). Its core analytical logic, which evaluates sites simultaneously as heritage assets, spatial infrastructures, and governance challenges, is most directly applicable in cities where inner-city industrial land is under active relocation pressure, planning decisions remain open, and basic spatial and archival data are available. Criterion weighting is intentionally flexible: governance feasibility carries greater weight where public land management is weak, while heritage value criteria take precedence where conservation capacity is stronger.

Two limitations affect transferability: 1) the predominance of European cases raises questions about governance model applicability in Southeast Asian contexts; comparative research in Shanghai and Penang would provide important complementary insights (Sun and Chen, 2023; Yee Sing and Yoh, 2016); 2) the absence of direct policy-maker engagement also limits institutional analysis. Pilot application with local planning authorities represents the appropriate next stage of validation.

Implications for the SDGs | The research contributes most directly to SDG 9 (Industry, Innovation and Infrastructure) by repositioning industrial heritage as innovation-oriented urban infrastructure supporting cultural production, creative industries, and knowledge-based activities. Equally central is SDG 10 (Reduced Inequalities): the structural

gap between planning allocations and community preferences documented in this study reflects an institutional logic that systematically excludes lower-income residents from the benefits of urban regeneration; the SAT addresses this through indicators for non-commercial floor area, stakeholder participation depth, and displacement risk monitoring (Ricci, Poli and Marino, 2025). SDG 11 (Sustainable Cities and Communities) is addressed through heritage preservation and the activation of underused inner-city spaces as components of inclusive urban infrastructure.

Indirect synergies extend across the broader 2030 Agenda. SDG 8 benefits from creative industry and cultural tourism activities; SDG 3 through health and well-being gains associated with accessible public green space in regenerated industrial environments; SDG 4 through educational and training reuse scenarios; SDG 12 through material reuse and deconstruction strategies that reduce embodied carbon (Baiani et alii, 2024); and SDGs 13 and 16 through reduced demolition-rebuild cycles and inclusive governance of land-use decisions, respectively.

Two trade-offs require acknowledgement: 1) heritage-led regeneration risks gentrification and displacement when real estate pressure is not offset by affordable housing or community-use provisions; and 2) economic activation of sites may conflict with SDG 13 where commercial programming generates energy demand and waste without adequate mitigation. SDG 17 is reflected in the international collaborative basis of the EUNIC research network, though it remains a contextual rather than central analytical dimension of the study.

Conclusion | This study examined the adaptive reuse potential of 95 inner-city industrial facilities in Hanoi's relocation programme through a four-phase mixed-methods framework combining GIS mapping, morphological analysis, a community survey (n = 1,040), and comparative analysis of 104 international cases. Two research questions were addressed: whether relatively recent industrial facilities in late-industrialising cities can be recognised as heritage, and which international conversion models offer transferable lessons. Both questions receive affirmative answers grounded in empirical evidence. The 95 facilities possess significant heritage and spatial value despite their relatively recent construction: 28 carry notable historical and architectural significance, and the broader dataset reveals spatial qualities – open floor plates, robust structures, and courtyard configurations – that support adaptive reuse across diverse functional programmes. The international comparison confirms that culture-led reuse, hybrid governance models, and flexible programming supporting creative industries and community activities recur as features of successful conversions across different governance and investment contexts. These patterns align with community survey results in Hanoi, where 55% of respondents favour cultural and public functions, against fewer than 1% allocated to cultural uses in current planning frameworks.

The study makes three contributions: 1) Empirically, it documents a structural gap between planning allocations, community preferences, and international precedents that cannot be explained by information deficits alone, but reflects the institutional logic of land-revenue dependence in rapidly

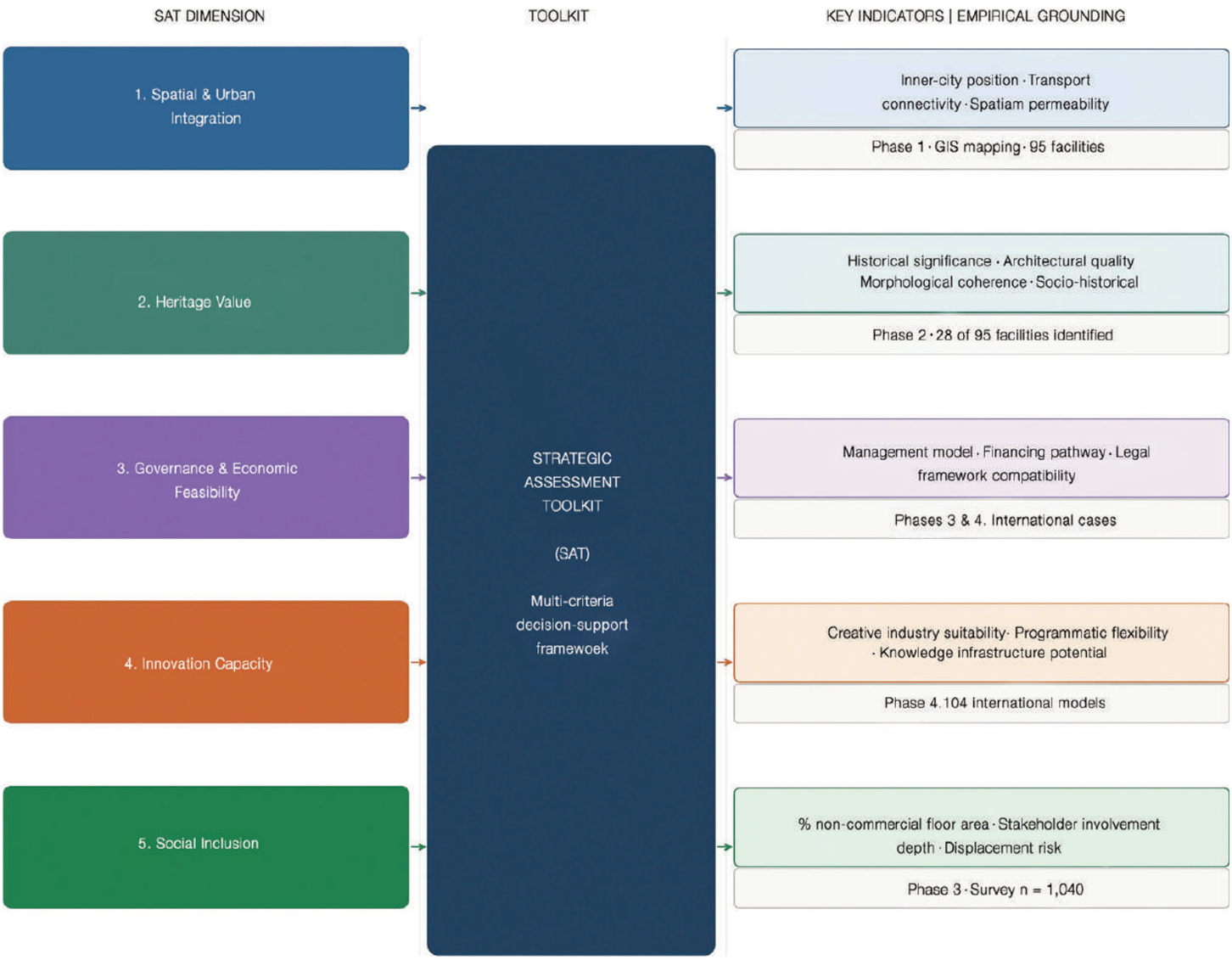


Fig. 12 | Structure of the Strategic Assessment Toolkit (SAT): five evaluation dimensions, key indicators, and empirical grounding (credit: EUNIC-HAU, 2022; adapted by the Author).

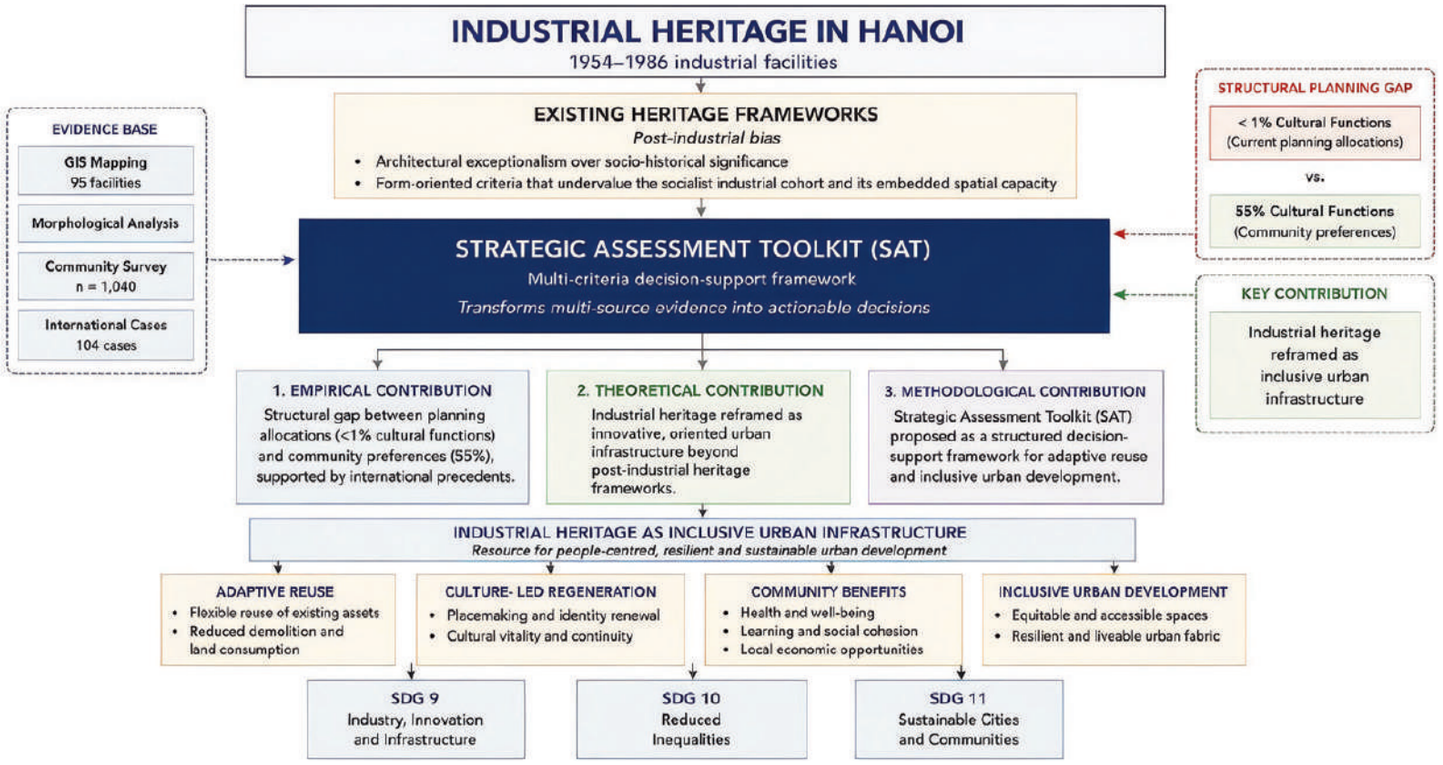


Fig. 13 | Synthesis of the evidence base, SAT and research contributions for reframing Hanoi's industrial heritage as inclusive, innovation-oriented urban infrastructure (credit: the Author, 2026.)

urbanising cities. 2) Theoretically, it identifies a post-industrial bias in dominant heritage frameworks and reframes industrial heritage as innovation-oriented urban infrastructure whose value lies in spatial capacity and socio-historical memory as much as in architectural distinction. 3) Methodologically, it proposes a SAT that translates multi-source empirical evidence into a structured decision-support framework calibrated to Hanoi's institutional conditions and adaptable to other contexts where inner-city industrial land is under active relocation pressure. Figure 13 synthesises the evidence base, the SAT and the paper's main contributions, showing how industrial heritage can be reframed as inclusive, innovation-oriented urban infrastructure. Limitations include the predominance of European cases in the international database and the absence of direct policy-maker engagement.

Limitations include the predominance of European cases in the international database and the absence of direct policy-maker engagement. Future research should extend comparative analysis to Southeast and East Asian cities and pursue pilot application of the SAT with planning authorities to validate its operational utility. The gender dimensions of industrial heritage, largely absent from this study, represent a further direction for inquiry. More broadly, addressing the full complexity of industrial heritage regeneration – including the intersecting risks of climate change, material degradation, and environmental fragility – requires multidisciplinary frameworks that go beyond linear conservation approaches and integrate predictive risk assessment across multiple temporal and spatial scales (Biasi et alii, 2024). Hanoi's experience illustrates a broader challenge facing rapidly urbanising cities in late-industrialising regions: relocation policies driven by environmental and land-optimisation objectives risk permanently foreclosing the heritage, spatial, and social value embedded in inner-city industrial fabric. Adaptive reuse offers a viable alternative, not as a conservation measure alone, but as a strategy for building inclusive, innovation-capable urban infrastructure from existing urban assets.

Acknowledgements

This research was conducted within the framework of the project 'Repurposing Industrial Heritage', co-funded by the European Commission under the European Spaces of Culture initiative, a Preparatory Action of the European Parliament implemented by EUNIC in collaboration with the European Commission and the European External Action Service (EEAS), and carried out during the period 2021-2022. The project involved seven EUNIC members (Goethe-Institut, British Council, Wallonia-Brussels Delegation, Embassy of Italy, Embassy of the Netherlands, Embassy of Spain, and Embassy of Hungary), the EU Delegation to Vietnam, and a network of local and expert partners including Hanoi Architectural University (HAU), For a Livable Hanoi, Heritage Space, Vietnam Sustainability Social Enterprise, UNESCO Vietnam, Hanoi Ad Hoc, and PRX Vietnam, with additional institutional support from the Embassy of Sweden, the Ministry of Foreign Affairs of the Czech Republic, the Embassy of Romania, Undecided Production, and the Embassy of Poland.

The HAU Research Team acted as the lead academic partner in the project, responsible for the conceptual development, methodological design, field investigations, and the preparation of the final technical report. The Author served as head of the HAU Research Team and coordinated the research design and analytical framework.

The research has been completed and is based on a project-specific dataset developed within the project, combining 104 international case studies and field investigations conducted in Hanoi and other Vietnamese cities in 2021-2022. The dataset includes variables related to spatial configuration, governance models, financial mechanisms, and public accessibility in post-industrial regeneration processes, and underpins the methodological framework (SAT) proposed in this article.

Note

1) Administrative districts referred to in this study correspond to Hanoi's administrative division prior to 1 July 2025, when district-level administrative units were officially abolished under Vietnam's administrative restructuring reform.

References

Andres, D. L. and Grésillon, D. B. (2011), "Brownfield lands in European cultural and creative cities – A comparative overview", in *L'Espace Géographique*, vol. 40, issue 1, pp. 15-30. [Online] Available at: doi.org/10.3917/eg.401.0015 [Accessed 9 April 2026].

Arbab, P., and Alborzi, G. (2022), "Toward developing a sustainable regeneration framework for urban industrial heritage", in *Journal of Cultural Heritage Management and Sustainable Development*, vol. 12, issue 3, pp. 263-274. [On-

line] Available at: doi.org/10.1108/JCHMSD-04-2020-0059 [Accessed 9 April 2026].

Baiani, S., Altamura, P., Turchetti, G. and Romano, G. (2024), "Transizione energetica e circolare del patrimonio industriale – Il caso dell'ex SNIA a Roma | Energy and circular transition of the industrial heritage – The Ex SNIA case in Rome", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 15, pp. 190-203. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/15152024 [Accessed 9 April 2026].

Barles, S. (2010), "Society, energy and materials – The contribution of urban metabolism studies to sustainable urban development issues", in *Journal of Environmental Planning and Management*, vol. 53, issue 4, pp. 439-455. [Online] Available at: doi.org/10.1080/09640561003703772 [Accessed 9 April 2026].

Berretta, T., Desideri, F. and Staltari, M. (2024), "Il progetto dello spazio pubblico, tra complessità e crisi ecologica – Da sfida a opportunità per la rigenerazione urbana | Public space project, between complexity and ecological crisis – From challenge to opportunity for urban regeneration", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 16, pp. 74-87. [Online] Available at: doi. org/10.19229/2464-9309/1662024 [Accessed 9 April 2026].

Biasi, A., Riavis, V., Zamboni, I. and Cervesato, A. (2024), "Patrimonio architettonico urbano e cambiamento climatico – Un'occasione per affrontarne la complessità | Urban architectural heritage and climate change – An opportunity to address its complexity", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 16, pp. 130-143. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/16112024 [Accessed 9 April 2026].

Cellucci, C., Revellini, R. and Tatano, V. (2025), "Quale genere di città – Rigenerazione urbana tra intersezionalità e inclusione | What kind of city – Urban regeneration between intersectionality and inclusion", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 17, pp. 108-119. [Online] Available at: doi.org/10.69143/2464-9309/1762025 [Accessed 9 April 2026].

Çeltekligil, A. and Arabacıoğlu, F. P. (2025), "Adaptive Reuse in Industrial Heritage – A Bibliometric Review (2004-2024)", in *Proceedings of the International Conference of Contemporary Affairs in Architecture and Urbanism – ICCAUA*, vol. 8, issue 1, pp. 850-862. [Online] Available at: doi.org/10.38027/ICCAUA2025EN0108 [Accessed 9 April 2026].

Creswell, J. W. and Plano Clark, V. L. (2018), *Designing and Conducting Mixed Methods Research*, SAGE Publications, Los Angeles.

Djebbour, I. and Biara, R. W. (2020), "The Challenge of Adaptive Reuse Towards the Sustainability of Heritage Buildings", in *International Journal of Conservation Science*, vol. 11, issue 2, pp. 519-530. [Online] Available at: proquest.com/openview/2561d7343150de0baca02a9fe7463a3f/1?pq-origsite=gscholarandcbl=5327637 [Accessed 9 April 2026].

Fan, C. C. and Scott, A. J. (2003), "Industrial Agglomeration and Development – A Survey of Spatial Economic Issues in East Asia and a Statistical Analysis of Chinese Regions", in *Economic Geography*, vol. 79, issue 3, pp. 295-319. [Online] Available at: jstor.org/stable/30032934 [Accessed 9 April 2026].

Fu, Y. and Yang, M. (2026), "The Rebirth of Industrial Heritage – How the Regeneration of Historical Spaces Impacts People's Mental and Physical Health Through Restorative Perception", in *Buildings*, vol. 16, issue 2, article 290, pp. 1-28. [Online] Available at: doi.org/10.3390/buildings16020290 [Accessed 9 April 2026].

Garda, E., Casale, T., D'Orazio, A., Di Mari, G., Franchini, C., Mattogno, C., Mele, C., Prencipe, M. and Renzulli, A. (2025), "Svelare l'invisibile – Progetti di ricerca per la parità di genere nel patrimonio costruito | Unveiling the invisible – Research Projects for Gender Equality in the Built Heritage", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 17, pp. 168-179. [Online] Available at: doi.org/10.69143/2464-9309/17112025 [Accessed 9 April 2026].

Grésillon, B. (2011), "La reconversion d'un espace productif au cœur d'une métropole – L'exemple de la Friche de la Belle de Mai à Marseille", in *Rives méditerranéennes*, vol. 38, pp. 87-101. [Online] Available at: doi.org/10.4000/rives.3977 [Accessed 9 April 2026].

Grodach, C. and Loukaitou-Sideris, A. (2007), "Cultural Development Strategies and Urban Revitalization – A survey of US cities", in *International Journal of Cultural Policy*, vol. 13, issue 4, pp. 349-370. [Online] Available at: doi.org/10.1080/10286630701683235 [Accessed 9 April 2026].

Gürcanlı, G. E., Hartmann, T., Nurkaliyev, M. and Özgür, M. (2024), "Industrial heritage restoration / renovation projects and their societal impacts – Case of Gasholder Restoration Projects", in *Societal Impacts*, vol. 3, article 100062, pp. 1-7. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.socimp.2024.100062 [Accessed 9 April 2026].

ICOMOS and TICCIH (2011), *Joint ICOMOS-TICCIH Principles for the Conservation of Industrial Heritage Sites, Structures, Areas and Landscapes – The Dublin Principles*. [Online] Available at: ticcih.org/wp-content/uploads/2013/10/GA2011_ICOMOS_TICCIH_joint_principles_EN_FR_final_20120110.pdf [Accessed 9 April 2026].

Kennedy, C., Cuddihy, J. and Engel-Yan, J. (2007), "The Changing Metabolism of Cities", in *Journal of Industrial Ecology*, vol. 11, issue 2, pp. 43-59. [Online] Available at: doi.org/10.1162/jie.2007.1107 [Accessed 9 April 2026].

Lanini, L., Sepe, M., Barsanti, E., Crudeli, A. and Marcheschi, C. (2025), "Abitare l'Università – Linee guida per nuovi poli e spazi pubblici per una vivibilità urbana sostenibile | Living the University – Guidelines for new campuses and public spaces for sustainable urban livability", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 17, pp. 208-225. [Online] Available at: doi.org/10.69143/2464-9309/17142025 [Accessed 9 April 2026].

Larkin, B. (2013), "The Politics and Poetics of Infrastructure", in *Annual Review of Anthropology*, vol. 42, pp. 327-343. [Online] Available at: doi.org/10.1146/annurev-anthro-092412-155522 [Accessed 9 April 2026].

Lee, S.-W., Song, D.-W. and Ducruet, C. (2008), "A tale of Asia's world ports – The spatial evolution in global hub port cities", in *Geoforum*, vol. 39, issue 1, pp. 372-385. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.geoforum.2007.07.010 [Accessed 9 April 2026].

López-Bravo, C., Lonardo, E. and Rosado, A. C. (2020), "Using or reusing? Parameter analysis of infrastructure refurbishment projects as touristic products", in Pié, R., Rosa, C., Vilanova, J. M., Sabaté, J. and Porfido, E. (eds), *TOURISCAPE2 – Transversal Tourism and Landscape, Conference Proceedings, Barcelona, Spain, November 5-6, 2020*, UPCommons, Barcelona, pp. 651-555. [Online] Available at: re.public.polimi.it/bitstream/11311/1185609/1/Using%20or%20reusing%3F%20Parameter%20analysis%20of%20infrastructure%20refurbishment%20projects%20as%20touristic%20products.pdf [Accessed 9 April 2026].

Mehan, A. (2025), "Ripensare i paesaggi post-industriali attraverso la lente dello sviluppo sostenibile | Reimagining post-industrial landscapes through the lens of sustainable development", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 17, pp. 120-129. [Online] Available at: doi.org/10.69143/2464-9309/1772025 [Accessed 9 April 2026].

Meng, F., Zhi, Y. and Pang, Y. (2023), "Assessment of the Adaptive Reuse Potentiality of Industrial Heritage Based on Improved Entropy TOPSIS Method from the Perspective of Urban Regeneration", in *Sustainability*, vol. 15, issue 9, article 7735, pp. 1-23. [Online] Available at: doi.org/10.3390/su15097735 [Accessed 9 April 2026].

Moldoveanu, M. and Franc, V.-I. (2014), "Urban Regeneration and More Opportunities for Artistic Expression and Cultural Consumption", in *Procedia Economics and Finance*, vol. 8, pp. 490-496. [Online] Available at: doi.org/10.1016/S2212-5671(14)00118-X [Accessed 9 April 2026].

Nguyen, T. H. (2025), "European Experiences with Repurposing of Industrial Facilities – Towards Potential Solutions for Hanoi, Vietnam", in Vien, H. T., Pomeroy, G. M. and Ngoc Hieu, N. (eds), *Proceedings of the 16th Asian Urbanization Conference – AUC2024 – Forgiving a Livable and Sustainable Urban Future*, *Binh Duong Province – Ho Chi Minh City, Vietnam, January 11-13, 2024*, Springer, Singapore, pp. 51-58. [Online] Available at: doi.org/10.1007/978-981-96-9924-7_4 [Accessed 9 April 2026].

Plevoets, B. and Van Cleempoel, K. (2019), *Adaptive Reuse of the Built Heritage – Concepts and Cases of an Emerging Discipline*, Routledge, London.

Putilov, I. D. and Bazilevich, M. E. (2021), "Perspective Directions of Renovation of Industrial Enterprises on the Example of Khabarovsk City", in *IOP Conference Series | Materials Science and Engineering*, vol. 1079, article 062007, pp. 1-6. [Online] Available at: doi.org/10.1088/1757-899X/1079/6/062007 [Accessed 9 April 2026].

Ricci, L., Poli, I. and Marino, M. (2025), "Welfare urbano e rigenerazione – Sostenibilità e inclusione sociale per il raggiungimento degli SDG | Urban welfare and regeneration – Sustainability and social inclusion for achieving the SDGs", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 17, pp. 94-107. [Online] Available at: doi.org/10.69143/2464-9309/1752025 [Accessed 9 April 2026].

Romanelli, M. and Zbuchea, A. (2020), "Knowledge-based social innovation for cultural endeavours revitalising urban structures", in *International Journal of Knowledge-Based Development*, vol. 11, issue 1, pp. 98-121. [Online] Available at: doi.org/10.1504/ijkbd.2020.106837 [Accessed 9 April 2026].

Sorbo, E., Moretto, T., Grandi, S. and Modena, G. (2025), "Identità culturali e sviluppo sostenibile – Un modello metodologico per l'Arsenale di Venezia | Cultural identity and sustainable development – A methodological model for the Venetian Arsenal", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 17, pp. 130-145. [Online] Available at: doi.org/10.69143/2464-9309/1782025 [Accessed 9 April 2026].

Sun, M. and Chen, C. (2023), "Renovation of industrial heritage sites and sustainable urban regeneration in post-industrial Shanghai", in *Journal of Urban Affairs*, vol. 45, issue 4, pp. 729-752. [Online] Available at: doi.org/10.1080/07352166.2021.1881404 [Accessed 9 April 2026].

Szopińska-Mularz, M., Prokop, A., Wikiera, M., Bukowy, W., Forsman, F. and Vikström, S. (2025), "Adaptive Reuse of Urban Structures as a Driver of Sustainable Development Goals – A Systematic Literature Review", in *Sustainability*, vol. 17, issue 11, article 4963, pp. 1-28. [Online] Available at: doi.org/10.3390/su17114963 [Accessed 9 April 2026].

TICCIH (2003), *The Nizhny Tagil Charter for the Industrial Heritage*. [Online] Available at: ticcih.org/about/charter/ [Accessed 9 April 2026].

Tiesdell, S., Oc, T. and Heath, T. (2013), *Revitalising Historic Urban Quarters*, Taylor and Francis, Hoboken.

UNESCO (2023), *Urban Heritage for Resilience – Consolidated Results of the Implementation of the 2011 Recommendation on the Historic Urban Landscape*. [Online] Available at: doi.org/10.58337/CFZO9650 [Accessed 9 April 2026].

UNESCO (2011), *Recommendation on the Historic Urban Landscape*. [Online] Available at: whc.unesco.org/uploads/activities/documents/activity-638-98.pdf [Accessed 9 April 2026].

Yee Sing, T. and Yoh, S. (2016), "Rehabilitation Methods and Revitalization Strategies in the Old Inner-City Areas of Rapid Growth Cities in Asia – A comparison of four cities – Penang, Hanoi, Shanghai, and Tokyo", in *Urban and Regional Planning Review*, vol. 3, pp. 1-20. [Online] Available at: doi.org/10.14398/urpr.3.1 [Accessed 9 April 2026].

Yin, R. K. (2018), *Case Study Research and Applications*, SAGE Publications, Thousand Oaks.

Yusuf, S. and Nabeshima, K. (2005), "Creative industries in East Asia", in *Cities*, vol. 22, issue 2, pp. 109-122. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.cities.2005.01.001 [Accessed 9 April 2026].

Zhang, S. (2007), "Conservation and adaptive reuse of industrial heritage in Shanghai", in *Frontiers of Architecture and Civil Engineering in China*, vol. 1, issue 4, pp. 481-490. [Online] Available at: doi.org/10.1007/s11709-007-0065-4 [Accessed 9 April 2026].

ARCHITECTURE
Research & Experimentation

AGATHÓN – International Journal of Architecture, Art and Design | n. 19 | 2026 | pp 150-171
ISSN print: 2464-9309 – ISSN online: 2532-683X | doi.org/10.69143/2464-9309/1992026

Article Info

Received 10 March 2026
Revised 15 April 2026
Accepted 18 April 2026
Published 30 June 2026

INFRASTRUTTURE DI PROSSIMITÀ
Metodi e strategie per la rigenerazione dei comparti ferroviari della rete lombarda

INFRASTRUCTURES FOR PROXIMITY
Methods and strategies for the regeneration of railway station areas in the Lombardy network

Maria Pilar Vettori, Silvia Battaglia, Francesca Daprà, Andrea Dechamps

Abstract

La rigenerazione delle stazioni ferroviarie rappresenta un ambito strategico per l'integrazione tra le infrastrutture di mobilità, lo spazio pubblico e la coesione territoriale. Il contributo propone un metodo sistemico per l'analisi e l'orientamento programmatico degli interventi sui comparti ferroviari, intesi come infrastrutture territoriali di prossimità, capaci di promuovere l'equità territoriale e l'inclusione sociale. A partire dal confronto tra modelli nazionali e internazionali e dall'analisi del sistema ferroviario lombardo la ricerca definisce uno strumento multicriteriale finalizzato all'analisi e alla valutazione delle stazioni e alla costruzione di indirizzi operativi per la loro rigenerazione. L'applicazione al caso di Milano Cadorna (Italia) restituisce un profilo per macroaree, evidenziando criticità, potenzialità e priorità di intervento e configurando un metodo replicabile su scala di rete. Il paper si propone come chiave di lettura di un Patrimonio infrastrutturale oggi bisognoso di una rigenerazione sistemica replicabile in contesti ferroviari regionali analoghi.

The regeneration of railway stations represents a strategic field for integrating mobility infrastructures, public space, and territorial cohesion. This contribution proposes a systemic method for the analysis and programmatic orientation of interventions on railway station areas, understood as territorial infrastructures of proximity, capable of promoting territorial equity and social inclusion. Starting from a comparison between national and international models and from the analysis of the Lombardy railway system, the research defines a multi-criteria tool for the analysis and evaluation of stations and the development of operational guidelines for their regeneration. The application to the Milano Cadorna case (Italy) provides a profile structured by macro-areas, highlighting critical issues, opportunities, and intervention priorities, and outlining a method that can be replicated at the network scale. The paper presents an interpretative framework for an infrastructural heritage that now requires systemic regeneration, together with a method that can be replicated in comparable regional railway contexts.

Keywords

stazioni ferroviarie, rigenerazione dei comparti di stazione, infrastrutture di prossimità, intermodalità, valutazione multicriteriale

railway stations, station area regeneration, proximity infrastructures, intermodality, multicriteria evaluation

Maria Pilar Vettori, Architect and PhD, is an Associate Professor at the Politecnico di Milano (Italy). She conducts research on workplace well-being and sports spaces, and on their role in urban and social regeneration processes. E-mail: mariapilar.vettori@polimi.it

Silvia Battaglia, Architect and PhD, is a Research Fellow at the Politecnico di Milano (Italy), where she conducts research in Architectural Technology Design, focusing on processes, methods, and tools for urban regeneration. E-mail: silvia.battaglia@polimi.it

Francesca Daprà, Architect and PhD, is a Researcher at the ABC Department of the Politecnico di Milano (Italy). She conducts research in Architectural Technology, focusing on processes, methods, and tools for the regeneration of the built environment, with particular attention to religious heritage. E-mail: francesca.dapra@polimi.it

Andrea Dechamps, Architect, is a PhD Candidate at the Politecnico di Milano (Italy). He conducts research in Architectural Technology, particularly on project culture and the evolution of architecture as a complex discipline within the redefinition of professional roles and competencies. E-mail: andrea.dechamps@polimi.it

Fin dalla loro diffusione ottocentesca le reti ferroviarie e i relativi nodi infrastrutturali hanno costituito dispositivi che hanno caratterizzato l'impianto urbano europeo, organizzando relazioni spaziali, economiche e sociali su scala territoriale. Nella contemporaneità tali nodi non sono più esclusivamente luoghi di transito, bensì ambiti multiscalari chiamati a ridefinire il proprio ruolo tra efficientamento tecnico, qualità dello spazio pubblico e nuove istanze di inclusione e sostenibilità, in una rinnovata relazione tra infrastruttura e città. Le stazioni ferroviarie hanno progressivamente ampliato le loro funzioni e i loro significati urbani, evolvendosi da nodi logistici monumentali e catalizzatori della crescita industriale ottocentesca (Meeks, 1995; Bertolini and Spit, 1998) a poli multifunzionali e attori della riqualificazione territoriale a partire dagli anni '80 e '90 dello scorso secolo (Cervero, 1998; Bertolini, 1996; 1999; Peters and Novy, 2012).

La revisione della letteratura è stata condotta attraverso l'analisi di contributi scientifici recenti e di documenti istituzionali nazionali e internazionali sul tema della rigenerazione delle stazioni e dei sistemi di mobilità, selezionati in relazione alle dimensioni di accessibilità, intermodalità, prossimità, sostenibilità e governance. L'obiettivo della revisione è stato individuare modelli interpretativi e operativi utili alla costruzione del quadro teorico di riferimento e alla definizione delle dimensioni analitiche alla base del metodo proposto.

La recente trasformazione delle stazioni ha comportato l'integrazione di funzioni di servizio e di prossimità, nonché l'adozione di standard per l'inclusione sociale (Ricci, Poli and Marino, 2025; Cangelli, 2025), in continuità con approcci di pianificazione quali il Transit-Oriented Development (TOD), che promuovono densificazione mista e accessibilità sostenibile (Cervero, 1998; Bertolini, 1999; Banerjee and Saha, 2022) e la stazione quale nodo di inclusione (Canessa and Centanaro, 2024). Il paradigma della 'città dei 15 minuti' ha consolidato ulteriormente la potenzialità delle stazioni quali nodi locali per servizi essenziali, con ricadute sulla qualità della vita, sulla densificazione compatibile e sulla distribuzione dei servizi sul territorio (Ricci, Poli and Marino, 2025; Fiorini et alii, 2025; Otsuka and Reeve, 2024).

Nel contesto italiano la trasformazione dei comparti ferroviari si sviluppa lungo due direttrici principali: la riqualificazione delle grandi stazioni come dispositivi urbani complessi e la riconversione diffusa del Patrimonio tramite pratiche di riuso sociale e micro-hub di prossimità (RFI, 2015, 2022). La letteratura italiana ha privilegiato la valutazione del potenziale rigenerativo delle stazioni in relazione alle politiche urbane e alle trasformazioni simboliche e funzionali dello spazio-stazione (Conticelli, 2011; Paone, 2023), mentre la diffusione di pratiche partecipative ha rafforzato il ruolo degli attori locali nella definizione di spazi pubblici e servizi di welfare connessi alle stazioni (Campagnaro et alii, 2025).

Negli ultimi due decenni la digitalizzazione e l'attenzione alla sostenibilità hanno accelerato tale metamorfosi: la 'smartification' (sensori, bigliettazione elettronica e sistemi informativi) e le soluzioni integrate di mobilità (bike-sharing, parcheggi di interscambio e mobilità condivisa) hanno migliorato l'efficienza operativa e l'esperienza degli utenti, coerentemente con le politiche di riduzione delle emissioni e di rigenerazione degli spazi pubblici (UIC, 2017; Griffin and Sener, 2016; ITF, 2015; European Commission, 2011). In questa prospettiva alcuni studi hanno evidenziato come il futuro delle stazioni sia caratterizzato da una progressiva dissoluzione dei confini tra edificio e città, tra spazio pubblico e infrastruttura, configurando i nodi multimodali come ambienti porosi, che pongono l'uomo al centro e sono capaci di integrare funzioni urbane, servizi e sistemi digitali (ARUP, 2019, 2020). La stazione è stata progressivamente considerata un attore rilevante nella 'mobilità attiva' dei cittadini, contribuendo allo sviluppo di quartieri e contesti egualitari (ARUP, 2022): esperienze recenti mettono in luce il ruolo di piccoli hub e dispositivi multifunzionali di micromobilità come infrastrutture di connessione tra il nodo ferroviario, lo spazio pubblico e i servizi urbani (Fabbri, 2023).

Le evidenze empiriche e analitiche indicano come gli assetti infrastrutturali e le politiche di rigenerazione possano contribuire a una giustizia spaziale e a uno sviluppo sostenibile (Fiorini et alii, 2025; Cangelli, 2025), mentre pratiche partecipative e presidi civici consolidano la funzione sociale e identitaria delle stazioni (Bertolini, le Clercq and Kapoen, 2005; Campagnaro et alii, 2025; Setola and Borgianni, 2025). Persistono tuttavia sfide rilevanti: gestione e percezione della sicurezza, conciliazione tra tutela del Patrimonio e modernizzazione funzionale, complessità di una governance multilivello per interventi integrati (Berretta, Desideri and Staltari, 2024; Campagnaro et alii, 2025) e obsolescenza degli apparati tecnologici. In prospettiva le stazioni sono chiamate a svolgere ruoli ibridi, quali nodi multimodali e piattaforme per la transizione ecologica e sociale delle città, il che richiede approcci interdisciplinari per la loro comprensione e governance (Bertolini, 1999; Cervero, 1998).

A differenza delle prospettive che leggono la stazione prevalentemente come nodo (TOD, modello nodo-luogo) o come presidio civico (riusi sociali), il contributo concepisce la stazione come infrastruttura territoriale di prossimità, ovvero come dispositivo spaziale e sociale diffuso da leggere su scala di rete. L'originalità del paper risiede nella proposta di uno strumento multicriteriale e multiscalare che integra dimensioni infrastrutturali, spaziali e sociali in uno strumento comparativo orientato alla programmazione, colmando il divario tra approcci centrati sulla sola prestazione infrastrutturale e pratiche incentrate su riusi sociali puntuali e locali: lo studio si colloca così nel più ampio dibattito sulle infrastrutture di mobilità intelligenti e sostenibili come nuovo sistema di connessioni urbane, che richiede di integrare performance tecnica, qualità spaziale e obiettivi ambientali (Bruno et alii, 2024).

Alla luce del quadro delineato il contributo presenta gli esiti di una ricerca finalizzata a interpretare le stazioni ferroviarie come infrastrutture territoriali di prossimità su scala di rete, attraverso la messa a punto di uno strumento applicato al sistema delle stazioni lombarde e verificato nel caso di Milano Cadorna (Italia). La ricerca persegue tre obiettivi principali: 1) costruire un quadro conoscitivo comparabile delle stazioni sulla base di dimensioni infrastrutturali, spaziali e sociali; 2) definire uno strumento multicriteriale e multiscalare capace di orientare le scelte di rigenerazione; 3) verificarne l'efficacia, mediante un caso di studio complesso, nel supportare processi decisionali condivisi.

Il percorso metodologico si articola in tre fasi integrate: mappatura conoscitiva della rete lombarda; valutazione multicriteriale delle stazioni; applicazione al caso di Milano Cadorna. Coerentemente con tale impianto il testo si sviluppa in un percorso che, dopo il confronto tra alcune esperienze europee e italiane di rigenerazione delle stazioni, inquadra il sistema lombardo quale campo di applicazione della ricerca, espone il metodo elaborato, ne verifica l'operatività attraverso il caso studio di Milano Cadorna e infine discute gli esiti emersi in termini di criticità, potenzialità e trasferibilità.

In questa prospettiva il contributo intende offrire alla comunità scientifica un quadro concettuale e operativo per interpretare le stazioni come componenti di un'infrastruttura territoriale diffusa e per orientarne la rigenerazione mediante uno strumento comparativo e replicabile. L'apporto dello studio risiede, in particolare, nella possibilità di connettere la lettura sistemica, la valutazione multicriteriale e la definizione di indirizzi operativi, così da sostenere politiche e progetti in una prospettiva di equità territoriale, integrazione infrastrutturale e qualità dello spazio pubblico.

Esperienze a confronto per la rigenerazione delle stazioni | I casi di riferimento internazionali e nazionali sono stati selezionati in quanto espressione di due traiettorie oggi rilevanti nella rigenerazione ferroviaria europea e italiana: da un lato modelli orientati all'integrazione tra infrastruttura, sviluppo urbano e qualità dello spazio pubblico, dall'altro modelli centrati sul riuso sociale e sulla riattivazione capillare del Patrimonio esistente. In particolare il caso delle ferrovie olandesi è stato selezionato in virtù del fatto che i Paesi Bassi costituiscono uno dei laboratori più strutturati di integrazione tra trasporto e sviluppo urbano, come dimostra l'estesa bibliografia scientifica che se ne occupa attraverso una copiosa documentazione disponibile. La comparazione è stata condotta secondo criteri omogenei al fine di individuare le dimensioni metodologiche più utili alla costruzione del framework proposto.

Il fondamento teorico di tale approccio risiede nel modello 'nodo-luogo' elaborato da Bertolini (1996; 1999), che interpreta la stazione come dispositivo in cui si intrecciano l'accessibilità infrastrutturale (valore del nodo) e l'intensità funzionale urbana (valore del luogo). Il modello, sviluppato e applicato nel contesto olandese da Peek, Bertolini e De Jonge (2006), ha orientato le politiche di pianificazione integrate e le valutazioni del potenziale di sviluppo delle aree di stazione. La letteratura mostra che tale processo non è episodico né recente: alcuni studi documentano una fase di maturazione, caratterizzata dall'integrazione tra la riqualificazione infrastrutturale, lo sviluppo immobiliare e le nuove funzioni urbane (Bruinsma, 2009). In una prospettiva comparativa Peters e Novy (2012) collocano tali interventi all'interno dei megaprogetti di rigenerazione delle aree delle stazioni ferroviarie, evidenziando il potenziale conflitto tra sostenibilità dei sistemi di trasporto e competitività urbana.

Il modello olandese si fonda su una governance strutturata tra Nederlandse Spoorwegen (NS), responsabile della gestione del Patrimonio, e ProRail, gestore dell'infrastruttura, con il supporto di strumenti di policy quali Spoorbeeld e Het Stationsconcept[1] (Bureau Spoorbouwmeester, 2025). Gli Annual Report di NS (Nederlandse Spoorwegen, 2024) e il Transport Plan 2025 (Nederlandse Spoorwegen, 2025) attestano una strategia di rete orientata all'intermodalità, alla qualità spaziale e alla sostenibilità, applicata a oltre 400 stazioni. In tali do-

cumenti il ruolo delle stazioni è riletto come catalizzatore di spazio pubblico di prossimità, capace di favorire interazioni tra mobilità pubblica, ciclabilità, servizi e funzioni urbane nei pressi dei nodi ferroviari. Da tale quadro emergono dimensioni operative ricorrenti: accessibilità multimodale, integrazione con lo spazio pubblico urbano, attrattività territoriale, qualità ambientale e spaziale, circolarità e sostenibilità, mixité di funzioni e governance multilivello.

Nel contesto italiano la traiettoria si sviluppa con modalità diverse; a seguito della centralizzazione dei sistemi di controllo e della riduzione del presidio fisico delle stazioni Rete Ferroviaria Italiana (RFI, 2015) ha avviato una politica di riuso degli immobili, tramite il programma Stazioni Impresenziate, che attiva processi di riconversione mediante comodato gratuito a Enti locali e Organizzazioni del terzo settore: la stazione assume così una funzione di presidio territoriale e infrastruttura civica, ospitando servizi culturali, sociali e di prossimità. Il rapporto di Zandonai (2015) interpreta tali esperienze come l'attivazione di 'asset comunitari', articolando il ciclo di riuso in fasi che includono la governance, la sostenibilità economica e la valutazione degli impatti. In tale prospettiva la rigenerazione non è riducibile a una mera riqualificazione fisica, ma configura un processo di innovazione sociale che coinvolge attori pubblici, Enti proprietari e Organizzazioni della società civile e che rafforza il ruolo della stazione come presidio territoriale.

Il confronto tra le esperienze europea e italiana evidenzia due traiettorie complementari: da un lato un modello orientato alla trasformazione urbana e alla performance infrastrutturale, sostenuto da una consolidata tradizione teorica e istituzionale, dall'altro un modello diffuso e sociale, centrato sulla riattivazione del Patrimonio e sull'innovazione comunitaria (Tab. 1). In particolare il modello italiano privilegia la rifunzionalizzazione degli spazi, mentre risulta meno strutturato il rafforzamento degli elementi infrastrutturali, dell'intermodalità e della sostenibilità ambientale in un'ottica di equità territoriale su scala di rete.

Alla luce di tali evidenze e della letteratura recente sulla 'rigenerazione delle aree delle stazioni' emerge la necessità di un approccio capace di integrare la dimensione infrastrutturale, la qualità spaziale, la prossimità funzionale e la governance di rete. Sebbene tali dimensioni siano ampiamente riconosciute, nei casi analizzati risultano trattate in modo settoriale, privilegiando alternativamente la performance urbana o la riattivazione sociale del Patrimonio. In questo quadro il confronto tra i due modelli analizzati assume un ruolo fondativo nella costruzione del metodo proposto: le loro potenzialità e criticità sono state tradotte in dimensioni operative e successivamente integrate nel panel degli indicatori, definito sulla base della documentazione analizzata. Il contributo propone pertanto una lettura delle stazioni come infrastruttura territoriale diffusa, traducendo i riferimenti teorici su prossimità, intermodalità e governance in uno strumento multicriteriale applicabile al contesto italiano.

Il sistema delle stazioni lombarde come infrastruttura territoriale | Negli ultimi anni Regione Lombardia ha avviato iniziative volte a valorizzare il sistema delle stazioni ferroviarie lombarde, con l'obiettivo di rafforzarne il ruolo come presìdi riconoscibili e funzionalmente integrati nelle politiche di mobilità sostenibile e di rigenerazione urbana. La mole degli impianti ferroviari presenti sul territorio regionale è infatti cospicua: la rete si estende per circa 2.000 km e comprende 464 stazioni, di cui 125 (alcune inattive) sono a gestione regionale diretta e affidate in concessione a Ferrovie Nord (FN) mentre la restante parte è gestita da Rete Ferroviaria Italiana (RFI) e Ferrovie Emilia-Romagna (FER). Nel 2023 la Regione Lombardia ha promosso uno studio per lo 'sviluppo e valorizzazione del sistema delle stazioni ferroviarie e la progettazione di strumenti operativi' (SINLOC, 2023), finalizzato a individuare modelli operativi e strumenti replicabili per la rifunzionalizzazione del Patrimonio, con particolare attenzione alle Stazioni Impresenziate, in numero crescente[2]. Lo studio riconosce alle stazioni una nuova vocazione di interesse pubblico, da attuarsi attraverso il coinvolgimento delle Amministrazioni comunali e l'attivazione di nuovi servizi e funzioni di prossimità, soprattutto nei territori meno serviti. L'approccio privilegia modalità di riuso adattivo, leggere e reversibili, orientate alla conservazione del Patrimonio esistente e alla sostenibilità ambientale e sociale.

In tale ambito la rete in gestione a FN[3] rappresenta una parte rilevante dell'intera rete lombarda, risalente alla fine dell'Ottocento e diramata tra il cosiddetto Ramo Milano e il Ramo Iseo. Il Piano Strategico Ferrovie Nord Milano 2024-2029 (FNM, 2024a) riconosce alla rete ferroviaria il ruolo di asset infrastrutturale centrale, prevedendo investimenti di potenziamento e modernizzazione volti a migliorare la sicurezza, l'efficienza, la qualità del servizio e la sostenibilità ambientale, anche in un'ottica di mobilità sostenibile. In tale quadro la rete è intesa come struttura portante di un sistema regionale di mobilità integrata, la cui sostenibilità è stata recentemente dichiarata nel Bilancio di Sostenibilità (Trenord, 2024), che mira a migliorare la qualità ambientale e la circolarità nelle stazioni e nel servizio ferroviario.

Tra gli interventi prioritari si colloca il progetto FILI, programma integrato di trasformazione lungo l'asse Milano-Malpensa che interessa i principali nodi della rete (Milano Cadorna, Bovisa, Saronno e Busto Arsizio) e le loro aree limitrofe. Il progetto

Comparison criterion	NS Station Area Development (NL)	RFI Stazioni Impresenziate (IT)	Implications for the method
FRAMEWORK	Netherlands, entire railway system	Italian railway station heritage	Need for an approach adaptable to heterogeneous urban and territorial contexts
GOALS	Improvement of the urban and spatial quality of buildings and contexts	Reactivation of heritage and strengthening of territorial control	Integration of urban quality and the station's civic function
SCALE OF INTERVENTION	High-intensity urban interventions, similar to mega-projects	Widespread, capillary interventions across a national network of small and medium-sized stations	Introduction of a multi-scalar reading
GOVERNANCE	Structured multi-level framework (NS–ProRail–municipality); shared policy framework	Mainly local governance, based on agreements and protocols; involvement of the third sector	Integration of multi-level governance and participatory processes
MAIN REGENERATION DIMENSIONS	Multimodality, spatial quality, and environmental sustainability	Functionality and services, spatial quality, local proximity	Definition of the macro-areas of the multi-criteria checklist
INSTRUMENTS	Policy framework, guidelines, and urban transformation programmes	Reuse programmes, local agreements, and free-use agreements	Definition of a comparison tool based on selected benchmarks
STRENGTHS	Integration between infrastructure and city, high spatial quality, strong modal integration, standardisation of interventions, and formalised environmental criteria	Social activation, widespread reuse of heritage, territorial embeddedness, development of local services, and collaboration between institutions	Integration between infrastructural performance, spatial quality, and proximity services
CRITICAL ISSUES	High management and economic complexity, stronger concentration on the main nodes	Limited integration of environmental and intermodal dimensions, with site-specific interventions that are not always systemic	Need to overcome partial approaches by integrating the different dimensions that have emerged
TRANSFERABILITY	High in contexts characterised by structured governance and investment capacity	High in contexts with widespread heritage and active local networks	Definition of a modular and adaptable method

Tab. 1 | Comparison table of case studies between the Netherlands and Italy (credit: the Authors, 2026).

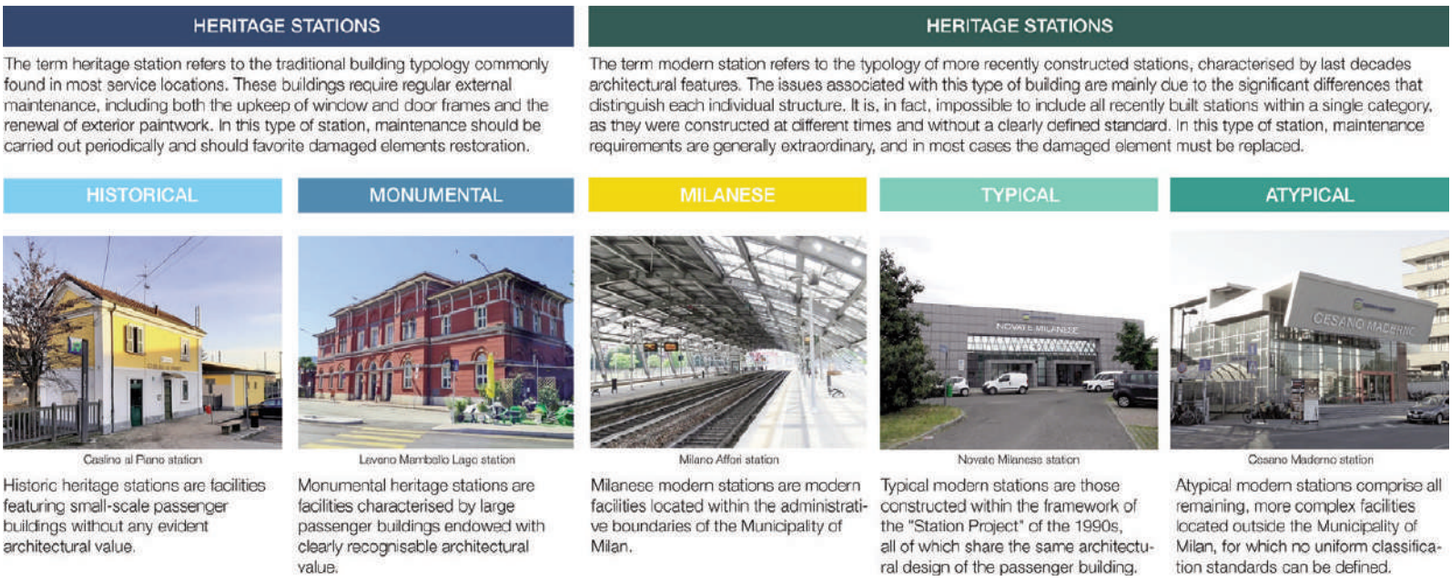


Fig. 1 | Classification of stations by typology (credit: the Authors, 2026).

opera a scala di corridoio infrastrutturale, articolando le azioni in tre livelli: rigenerazione dei nodi ferroviari, della superstrada ciclabile Milano-Malpensa (54 km) e interventi ambientali di riforestazione lungo l'asse. FILI assume la rete ferroviaria quale spina dorsale territoriale, integrando mobilità su ferro, mobilità dolce e continuità ecologica, rafforzando la lettura della ferrovia come infrastruttura urbana e territoriale integrata (FNM, 2024b).

Nel loro insieme le iniziative promosse da Regione Lombardia e dalle società del gruppo Ferrovie Nord Milano delineano una strategia di sviluppo che riconosce alla rete ferroviaria e alle sue stazioni un ruolo strutturante per l'accessibilità regionale, la transizione ecologica e l'equità territoriale. L'interesse istituzionale per interventi coordinati, multiscalari e replicabili conferma la centralità delle stazioni come dispositivi territoriali strategici, aprendo lo spazio a strumenti metodologici in grado di supportare in modo sistematico tali processi di trasformazione.

Un metodo sistemico per la rigenerazione delle stazioni come infrastrutture di prossimità | In tale ottica la ricerca propone un metodo operativo per orientare la trasformazione dei comparti ferroviari gestiti da Ferrovie Nord e delle aree limitrofe come perni di una rinnovata infrastruttura capillare di prossimità e di equità territoriale. La stazione è dunque assunta non solo come manufatto tecnico, ma come componente di un'infrastruttura territoriale di mobilità intelligente e sostenibile, in continuità con gli approcci che leggono le connessioni urbane come dispositivi integrati di trasporto, spazio pubblico e sostenibilità (Bruno et alii, 2024). Il metodo si articola in tre fasi integrate: analitico-conoscitiva, strategico-programmatica e applicativo-orientativa.

La prima fase analitico-conoscitiva consiste nella mappatura sistematica del Patrimonio ferroviario delle linee lombarde in gestione a Ferrovie Nord. L'analisi mira ad acquisire i dati relativi alle tipologie architettoniche e infrastrutturali delle stazioni[4], ai flussi dei passeggeri, al ranking funzionale in uso dal gestore[5] e allo stato dei manufatti (riqualificati o da riqualificare) da restituire, mediante una mappatura, per fornire un quadro conoscitivo strutturato su scala di rete. Parallelamente viene effettuata la catalogazione degli spazi sottoutilizzati o residuali nei fabbricati viaggiatori e nelle strutture limitrofe, al fine di individuare potenziali ambiti di attivazione. L'esito della fase consiste nella costruzione di una base territoriale e tipologica, funzionale a una lettura comparativa e multiscalare delle stazioni (Figg. 1-3). La seconda fase strategico-programmatica elabora uno strumento multicriteriale di analisi e valutazione, che costituisce il nucleo operativo del metodo; tale impianto metodologico si colloca nell'alveo degli approcci di previsione strategica urbana che operano su più scale, orientando scenari e priorità di intervento più che singoli progetti puntuali (Mantziaras, 2024).

Lo strumento multiscalare integra dimensioni urbane, infrastrutturali, architettoniche, gestionali e sociali e si compone di quattro elementi, valutabili in modo integrato:
1) Prevalutazione con posizionamento, elemento che acquisisce le classificazioni già condotte nella fase di mappatura, integrandole con l'inquadramento territoriale (urbano, periurbano ed extraurbano); la prevalutazione calibra l'applicazione della checklist in relazione al profilo della stazione e definisce il livello di approfondimento necessario;
2) Checklist multi-criteriale, elemento articolato in cinque macro-aree (accessibilità e intermodalità; funzionalità e prossimità; sostenibilità ambientale e sociale; qualità spaziale; sicurezza e presidio) e in criteri per ciascuna area, costituisce lo strumento principale di valutazione qualitativa; le aree, i criteri e gli indicatori derivano da una revisione sistematica della letteratura scientifica sui processi di rigenerazione delle stazioni, nonché dall'analisi di documenti e framework operativi istituzionali, internazionali e nazionali[6]; gli indicatori sono stati validati attraverso il confronto con gestori del Patrimonio e stakeholder territoriali; la checklist può essere applicata uniformemente a tutte le stazioni della rete e la percentuale di soddisfazione degli indicatori prevede una valutazione qualitativa espressa in livello alto, medio o basso[7];
3) Analisi tecnico-specialistiche mirate, attivate selettivamente a supporto della checklist, che includono rilievi dello stato di fatto, analisi dei vincoli, analisi delle caratteristiche storiche e architettoniche della stazione; analisi dei flussi, analisi delle caratteristiche gestionali della stazione e ulteriori analisi tecnico-specialistiche ove necessarie;
4) Strumenti di partecipazione multilivello, integrati nella fase valutativa e articolati in due livelli; il primo livello utilizza gli strumenti propri della partecipazione nell'ambito della governance tramite interviste, focus group e tavoli di lavoro con stakeholder, locali e sovralocali, con l'obiettivo di favorire il dialogo e lo sviluppo di policy condivise; il secondo livello coinvolge direttamente gli utenti della stazione e la popolazione tramite un questionario e l'avvio di tavoli di lavoro di co-progettazione; gli esiti partecipativi alimentano la definizione del quadro esigenziale e la selezione delle priorità.

L'esito della seconda fase è un profilo articolato per macroaree con una valutazione qualitativa che evidenzia criticità, ambiti consolidati e potenzialità di attivazione. La terza fase applicativo-orientativa consiste nell'applicare lo strumento ai comparti individuati. I risultati della fase strategico-programmatica vengono ricomposti in un profilo sintetico della stazione, che consente di graduare le priorità di intervento in relazione al ruolo della stazione nella rete, alla collocazione territoriale e allo stato dei manufatti. Sulla base di tale lettura vengono definiti indirizzi operativi e scenari di trasformazione coerenti con la configurazione del nodo.

Il metodo così articolato consente di passare dalla ricognizione analitica del Patrimonio a una programmazione selettiva degli interventi, garantendo la comparabilità su scala di rete e l'adattabilità ai singoli casi. Pur applicato alla sola rete lombarda di Ferrovie Nord risulta trasferibile a comparti analoghi: sono trasferibili in particolare la struttura in tre fasi, le macroaree di valutazione e l'integrazione tra analisi, partecipazione e indirizzi operativi, mentre restano specifici del caso Ferrovie Nord alcuni dispositivi classificatori (ranking e manuali interni) e la disponibilità di dati proprietari, sostituibili in altri contesti con sistemi equivalenti.

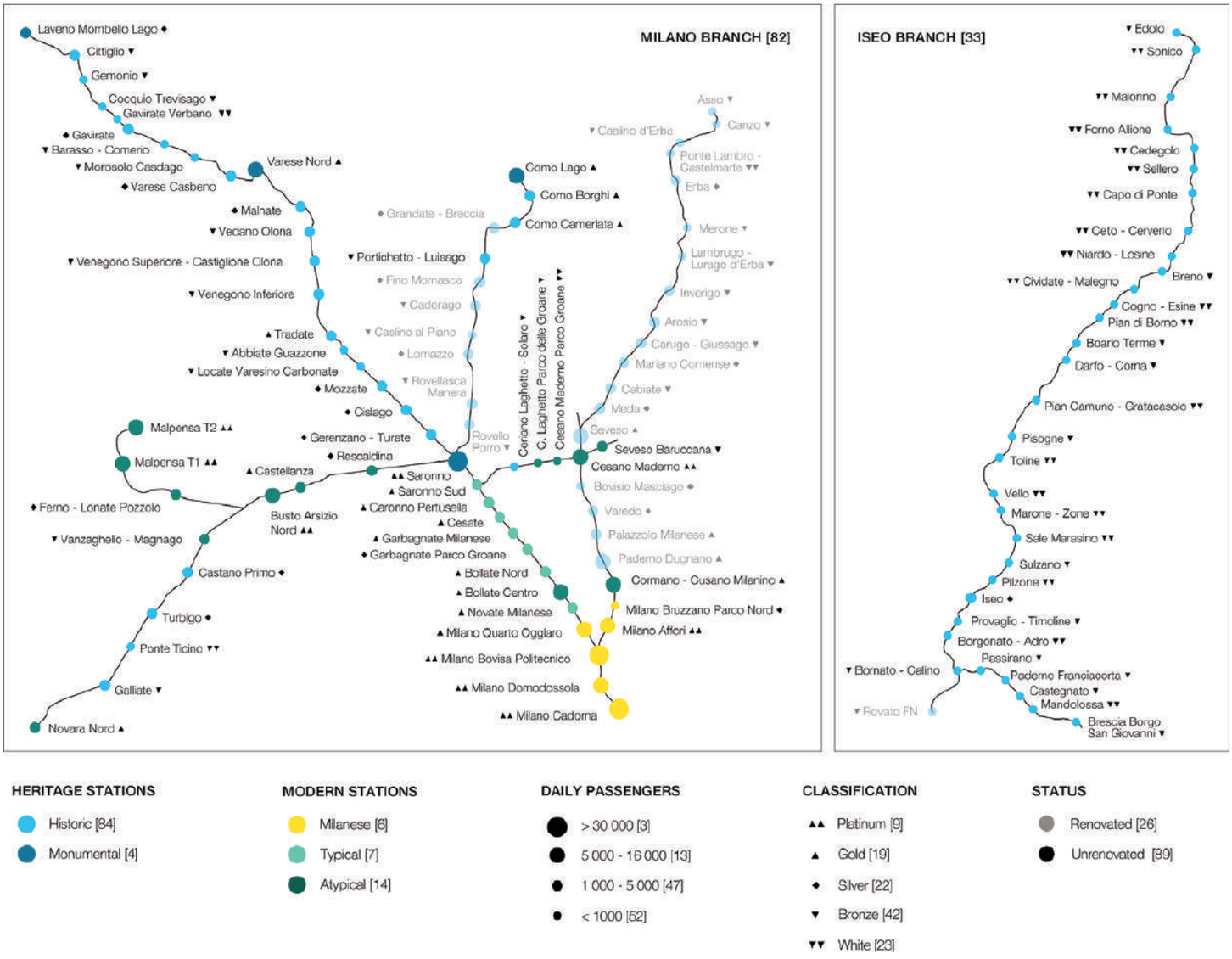


Fig. 2 | Mapping of the FN network (credit: the Authors, 2026).

Milano Cadorna: un caso applicativo | La stazione di Milano Cadorna è uno dei nodi storici e strategici del sistema ferroviario lombardo. Situata nel cuore del sistema urbano milanese, svolge un ruolo intermodale primario, integrando le linee ferroviarie del Ramo Milano di Ferrovie Nord, due linee metropolitane, il trasporto pubblico di superficie e numerosi percorsi ciclopedonali urbani. La sua stratificazione storica, costituita da un primo manufatto ottocentesco e da alcune trasformazioni avvenute nel periodo bellico e post-bellico, è tutt'oggi leggibile nei caratteri architettonici non omogenei del complesso (Fig. 4). Gli interventi avviati negli anni Duemila, tra cui la controfacciata del Palazzo progettata da Gae Aulenti e gli adeguamenti interni della stazione (Fig. 5), hanno ridefinito l'immagine contemporanea del comparto, lasciando tuttavia aperte criticità relative alla qualità spaziale, alla gestione dei flussi e all'adeguamento tecnologico e normativo (Cornolò, 2006). Inoltre si evidenzia la necessità di coniugare la rigenerazione urbana dell'intero comparto con gli obiettivi del Piano Strategico del gruppo Ferrovie Nord Milano (FNM), con particolare riferimento alla qualità e alla sostenibilità ambientale (Figg. 6-8); al comparto di Cadorna è stato applicato lo strumento multicriteriale presentato.

La fase della 'prevalutazione' ha definito Cadorna come 'stazione moderna', con ranking 'platinum' e inquadramento territoriale urbano. Il numero di passeggeri giornalieri è pari a 65.490; i risultati sono stati costruiti a partire dagli indicatori e dalle evidenze riportate nella Tabella 2.

Sotto il profilo della 'accessibilità e intermodalità' la stazione presenta un elevato livello di integrazione modale, sebbene permangano diverse criticità nella leggibilità dei percorsi e nella gestione dei flussi: numerosi dislivelli limitano l'accessibilità universale tra metropolitana, atrio e banchine, nonché tra banchine e treni (Fig. 9). Nella macroarea 'funzionalità e prossimità' emerge una buona dotazione di servizi commerciali e di supporto alla mobilità, a fronte di una presenza limitata di funzioni civiche e di spazi di prossimità non commerciali, i quali risulterebbero significativi in relazione al contesto di riferimento (Fig. 10); la presenza di spazi inutilizzati o degradati evidenzia al contempo significative potenzialità di attivazione. In termini di 'sostenibilità ambientale e sociale' l'analisi ha evidenziato ampi margini di miglioramento nelle aree esterne, con particolare riferimento alle estese superfici impermeabili e alla scarsa qualità microclimatica (Fig. 11).

La macroarea 'qualità spaziale' ha evidenziato forti criticità nel fabbricato viaggiatori prospiciente il piazzale Cadorna (spazi degradati o sottoutilizzati, percezione di congestione, scarsa organizzazione della cartellonistica e scarsa integrazione dei sistemi audio-video) e nelle banchine (degrado dei materiali e necessità di adeguamento normativo). All'interno del comparto sono inoltre presenti ulteriori manufatti ad uso ferroviario e uffici (Palazzina Movimento e Palazzina Ingegneria), il cui stato manutentivo e prossimità ai binari, in particolare della Palazzina Movimento, incidono negativamente sulla qualità urbana del comparto. Rispetto alla 'sicurezza', pur essendo quasi costantemente presidiata, la Stazione presenta criticità negli spazi limitrofi alla piazza (Tab. 3).

In coerenza con l'impianto metodologico delineato, il profilo emerso dalla checklist è stato quindi approfondito mediante indagini tecnico-specialistiche mirate, attivate in ragione della complessità

del comparto e della sua stratificazione storica. Data la natura del caso studio la valutazione complessiva è stata infatti supportata da analisi relative agli aspetti trasportistici, strutturali, statici e geofisici, finalizzate a verificare le condizioni del fabbricato esistente e le effettive possibilità di intervento (Tab. 4).

La fase partecipativa è stata articolata in tavoli istituzionali con le diverse società del gruppo FNM operanti nella stazione e con Regione Lombardia, attraverso incontri strutturati e focus group. In particolare i tavoli di lavoro sono stati organizzati per ambiti tematici e livelli decisionali: tavoli regionali finalizzati alla definizione del quadro esigenziale complessivo; tavoli tecnici per l'approfondimento dello stato dei fabbricati e delle condizioni infrastrutturali; tavoli con i referenti delle diverse direzioni del gruppo (sostenibilità, funzionalità, servizio ferroviario) per l'individuazione di criticità e opportunità specifiche.

Tale processo ha contribuito alla definizione di un quadro esigenziale condiviso, orientato principalmente al rafforzamento dell'intermodalità, alla riqualificazione degli spazi pubblici e alla valorizzazione ambientale del comparto. I tavoli con i gestori dell'infrastruttura hanno evidenziato esigenze spaziali e funzionali specifiche, configurando Cadorna come caso peculiare di ibridazione tra spazi ferroviari e di lavoro, caratterizzati da una stretta interrelazione fisica e gestionale. È stato inoltre predisposto un questionario rivolto agli utenti e alla popolazione che frequenta il comparto, finalizzato a rilevare le modalità d'uso e i bisogni emergenti.[8]

Infine gli esiti della checklist e delle analisi tecnico-specialistiche, basati su evidenze verificabili, sono stati tradotti in indirizzi operativi e in priorità di intervento. Data la complessità e l'estensione del comparto (circa 58.000 mq), sono stati individuati i sottoambiti di riferimento, omogenei per carattere e tipologia (Fig. 12), per ciascuno dei quali sono stati definiti gli indirizzi specifici e le azioni prioritarie, a partire dalla correlazione tra i livelli emersi nelle macroaree e la matrice di posizionamento definita in fase di prevalutazione (Tab. 5).

Per il fabbricato viaggiatori (Area A – 4.545 mq), le criticità riscontrate orientano verso una riorganizzazione funzionale e spaziale dell'atrio e degli ambienti interni, finalizzata a migliorare gli accessi e la gestione dei flussi, a potenziare le aree di attesa e a rifunzionalizzare gli spazi inutilizzati. Gli interventi sulle volumetrie e sulla copertura della volta dovranno essere valutati in relazione agli esiti delle verifiche strutturali e ai vincoli di tutela, integrando le istanze di conservazione e di adeguamento funzionale. Per l'area delle banchine (Area B – 14.670 mq) gli esiti delle analisi indirizzano verso adeguamenti volti all'accessibilità universale dei treni e delle banchine, al miglioramento delle prestazioni ambientali e al rinnovo delle pavimentazioni e delle pensiline, in coerenza con l'identità complessiva della stazione.

Per l'area delle Palazzine (Area C – 8.170 mq), gli indirizzi invitano a migliorare la fruibilità dell'area e la connessione con il fabbricato viaggiatori, nonché a una profonda riqualificazione degli immobili ad uso ufficio (Palazzina Movimento e Palazzina Ingegneria) e dei loro spazi esterni di pertinenza, al fine di aumentare la qualità urbana e ambientale dell'area. Per l'area sottoponte e parcheggi (Area D – 20.810 mq) le criticità relative alla sostenibilità orientano verso interventi di miglioramento della fruibilità pedonale, incremento della qualità ambientale e azioni per la mitigazione del microclima e dell'inquinamento acustico, nonché la riorganizzazione delle superfici oggi destinate a parcheggio a raso.

Oltre agli indirizzi di intervento sui singoli ambiti è emersa la necessità di rafforzare la relazione sistemica tra la stazione e la città, con particolare riferimento al potenziamento della mobilità ciclabile, dell'interscambio multimodale e della qualità degli spazi pubblici limitrofi (Area E). Tali azioni estenderebbero la rigenerazione oltre il perimetro ferroviario, configurando Cadorna come infrastruttura urbana integrata, capace di contribuire all'accessibilità diffusa e alla qualità dello spazio pubblico in una prospettiva di equità territoriale.

A corollario dell'analisi sono state sviluppate alcune possibili traduzioni spaziali degli esiti analitici emersi, che non costituiscono evidenza del metodo, ma rappresentano una possibile visione progettuale degli indirizzi individuati, riferita ad alcuni elementi specifici del comparto (Figg. 13, 14).

Discussione: sinergie, compromessi, trasferibilità | Il contributo evidenzia come la rigenerazione dei comparti ferroviari richieda sinergie strutturate tra le proprietà dei Patrimoni infrastrutturali, le Amministrazioni pubbliche, gli Enti locali, gli investitori privati e le comunità locali. La natura ibrida della stazione – nodo tecnico e spazio pubblico – implica la necessità di conciliare istanze differenti, tra cui la

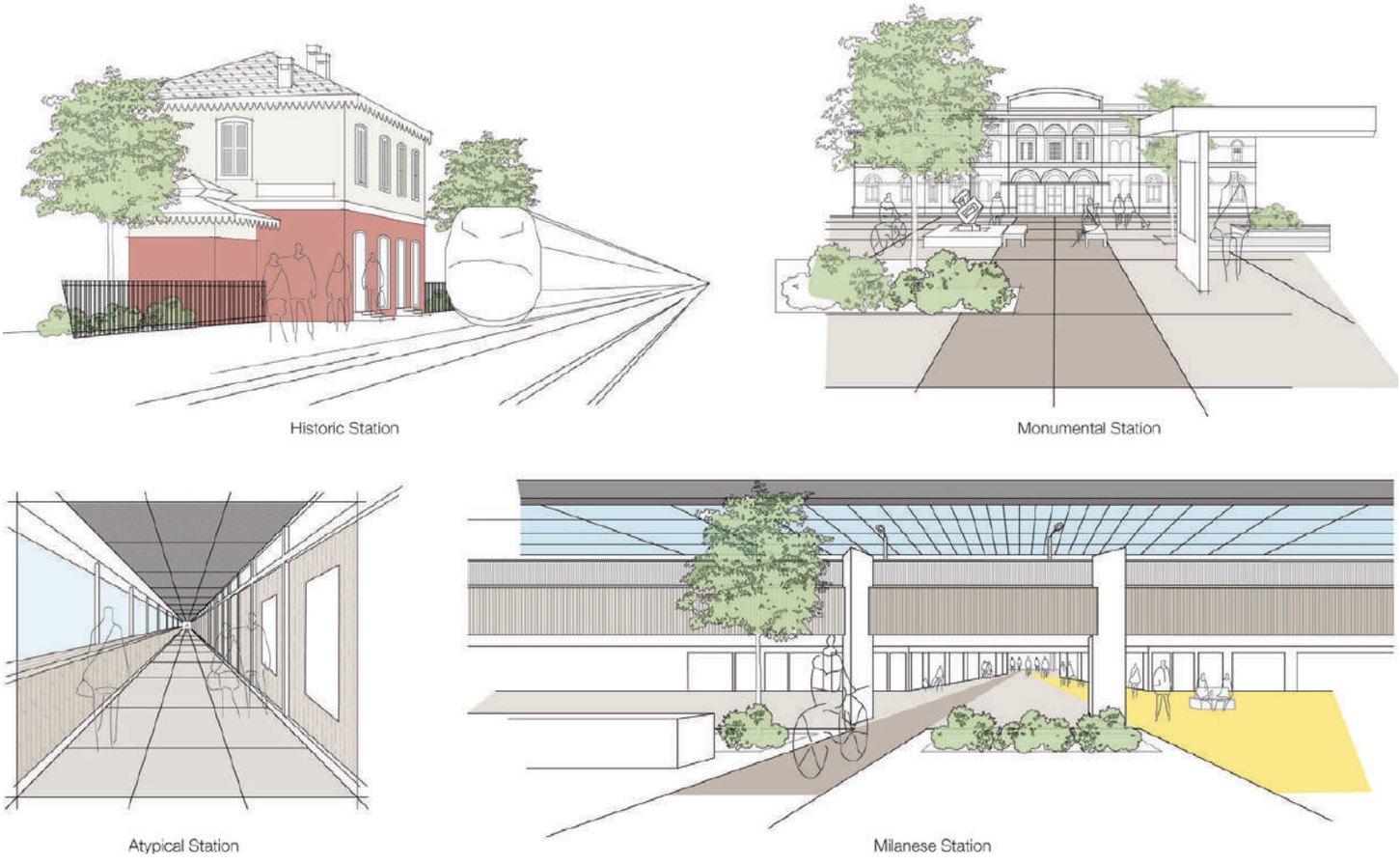


Fig. 3 | Examples of station typologies and characters (credit: the Authors, 2026).



Fig. 4 | Historical sequence of Milano Cadorna Station (Italy): historical photos (credits: FNM Group).

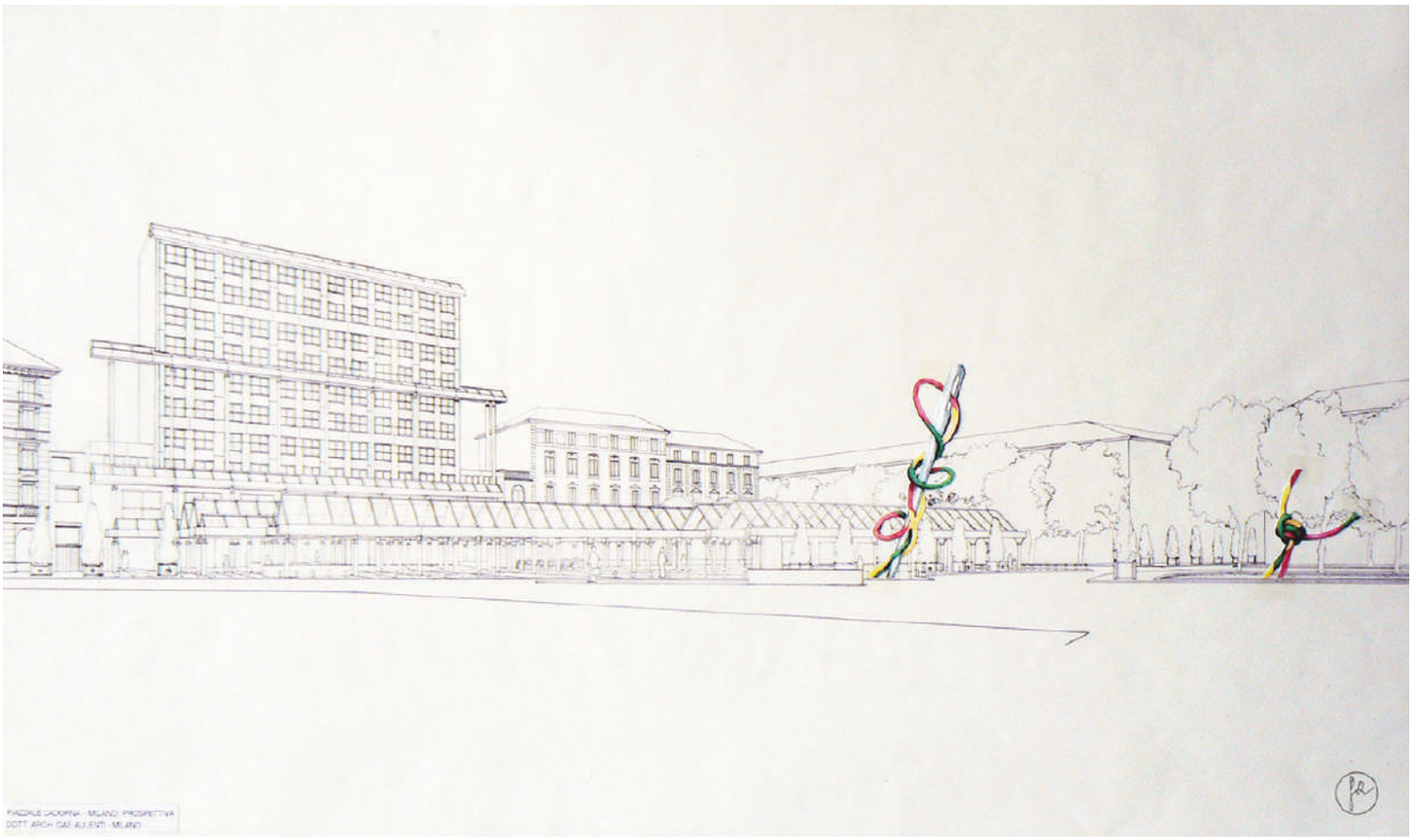


Fig. 5 | Sketch of the new Piazzale Milano Cadorna (2000), designed by Gae Aulenti (source: Lombardia Beni Culturali Online Archive).

Figg. 6, 7 | Aerial views of the Milano Cadorna station (credits: Google; M. P. Vettori, 2026).







Fig. 8 | Milano Cadorna station and adjacent station building: current state (credit: M. P. Vettori, 2026).

A. MULTIMODALITY AND ACCESSIBILITY

Criterion	Indicator	Evidence	Assessment	Data source	Data type	No. of indicators satisfied	% indicators satisfied	Outcome
A1. Modal integration	Surface public transport	Presence of at least one surface public transport mode within 500 m	TRUE	Analysis of ATM network data, urban mapping	Documentary	5	83.33%	HIGH
	Underground	Presence of at least one underground line within 500 m	TRUE	Analysis of ATM network data, MM, urban mapping	Documentary			
	Cycle infrastructure	Direct connection to the urban or territorial cycle network	TRUE	Analysis of data from the Municipality of Milan	Documentary			
	Cycling mobility services	Presence of at least two cycling mobility services (cycle hub, bicycle parking, and bike sharing)	FALSE	Analysis of data from the Municipality of Milan, BikeMI, PUMS, and survey	Documentary, observational			
	Interchange and parking facilities	Presence of interchange car parks or dedicated parking areas near the station	TRUE	Analysis of data from the Municipality of Milan and survey	Documentary, observational			
	Taxi stands	Presence of taxi stands	TRUE	Direct survey	Observational			
A2. Universal accessibility	Access systems to platforms	Access to platforms guaranteed by diversified systems (fixed stairs, escalators, lifts, and ramps)	FALSE	Ferrovie Nord cartography, survey	Cartographic, observational	0	0%	LOW
	Access control	Number and type of ticket barriers adequate for passenger flows, where present	FALSE	FN and Trenord data analysis, flow analysis, direct survey	Documentary, observational			
	Architectural barriers	Absence of architectural barriers within the station	FALSE	Direct survey, technical documentation	Observational			
	Routes for visually impaired users	Presence of tactile paving integrated into the floor surface (LOGES) and systems for visually impaired users	FALSE	Direct survey	Observational			
	Separation and clarity of flows	Separation and clarity of pedestrian and cycle-pedestrian flows	FALSE	Direct survey, flow analysis	Observational			
A3. Urban continuity	Urban underpasses and overpasses	Presence of underpasses or overpasses connecting neighbouring districts	FALSE	Milan Municipal Technical Map, survey	Cartographic, observational	1	33.33%	LOW
	Connection with public spaces	Direct connection with usable public spaces (squares and gardens)	TRUE	Milan Municipal Technical Map, survey	Cartographic, observational			
	Physical barriers to urban continuity	Absence of physical barriers (fences and walls) interrupting urban continuity	FALSE	Milan Municipal Technical Map, survey	Cartographic, observational			

B. FUNCTIONALITY AND PROXIMITY

Criterion	Indicator	Evidence	Assessment	Data source	Data type	No. of indicators satisfied	% indicators satisfied	Outcome
B1. Passenger services	Ticketing	Presence of ticketing systems, either automatic or staffed	TRUE	Direct survey, Trenord service documentation, FN	Observational, documentary	4	80%	HIGH
	Toilets	Presence of accessible toilets	TRUE	Direct survey, cartographic documentation	Observational, documentary			
	Waiting areas	Presence of waiting areas in the passenger building and on the platforms	FALSE	Direct survey, spatial analysis	Observational			
	Food and retail services	Presence of food or retail services	TRUE	Analysis of commercial data and FN space leases, direct survey	Documentary, observational			
	Lockers and integrated digital services	Presence of pick-up / locker systems or integrated digital services	TRUE	Analysis of FN concessions, direct survey	Documentary, observational			
B2. Civic and proximity services	Civic and public services	Presence of civic or public services (healthcare facilities, help desks, and information points)	TRUE	Analysis of FN space leases, direct survey	Documentary, observational	1	25%	LOW
	Cultural and associative functions	Presence of cultural or associative functions	FALSE	Analysis of FN space leases, direct survey	Documentary, observational			
	Social and inclusive services	Presence of social or inclusion-oriented services	FALSE	Analysis of FN space leases, direct survey	Documentary, observational			
	Territorial enhancement activities	Presence of activities enhancing local economies or territorial supply chains	FALSE	Analysis of FN space leases, direct survey, stakeholder interviews	Documentary, observational, interviews			
B3. Integration with the surrounding context	Commercial and proximity services	Presence of commercial activities and services within 200 m of the station	TRUE	Analysis of FN space leases, direct survey	Documentary, observational	3	100%	HIGH
	Cultural and tourist attractors	Presence of cultural or tourist attractors within 500 m of the station	TRUE	Urban analysis, Municipality of Milan cartography, survey	Documentary, observational			
	High-value landscape and environmental contexts	Presence of high-value landscape or environmental contexts near the station	TRUE	Territorial analysis, Municipality of Milan data, GIS	Documentary			

Tabb. 2a, 2b | Multi-criteria analysis checklist and application to Milano Cadorna station (credit: the Authors, 2026).

C. ENVIRONMENTAL AND SOCIAL SUSTAINABILITY

Criterion	Indicator	Evidence	Assessment	Data source	Data type	No. of indicators satisfied	% indicators satisfied	Outcome
C1. Environmental performance of the facility	Energy from renewable sources	Presence of systems for producing or using energy from renewable sources	FALSE	Technical documentation, FN manager data	Documentary	0	0%	LOW
	Energy saving	Presence of energy-saving solutions (efficient lighting and smart systems)	FALSE	Direct survey, FN technical documentation, and NordIng	Documentary, observational			
	Management and reuse of rainwater	Presence of solutions for the management and reuse of rainwater	FALSE	Map analysis and FN technical documentation	Documentary			
	Acoustic mitigation	Presence of solutions for mitigating noise pollution in railway areas	FALSE	Direct survey and technical documentation	Documentary, observational			
	Microclimatic mitigation	Presence of microclimatic mitigation solutions (greenery, shading, permeable surfaces, and fountains)	FALSE	Map analysis and direct survey	Documentary, observational			
C2. Sustainable management of spaces	Environmental protocols and certifications	Presence of environmental protocols or certifications	FALSE	Official FN documentation	Documentary	1	33.33%	LOW
	Waste management	Presence of waste management systems for separate collection and waste reduction	TRUE	Direct survey, FN technical documentation, and NordIng	Observational, documentary			
	Environmental impact	Presence of low-impact materials or design solutions	FALSE	Direct survey, material analysis, and technical documentation	Observational, documentary			
C3. Social impact and inclusion	Participation and co-design	Presence of structured participation and co-design processes	FALSE	Working group minutes and process documentation	Documentary	2	33.33%	LOW
	Institutional and territorial partnerships	Presence of active partnerships between the railway operator, public administrations, and the third sector	TRUE	Official documentation on current agreements and FN concessions; working groups with stakeholders	Documentary, interviews			
	Highly accessible public services	Presence of highly accessible public services (healthcare services and neighbourhood services)	TRUE	Service analysis and lease documentation	Documentary			
	Meeting and socialising spaces	Presence of usable meeting and socialising spaces (association spaces, volunteering spaces, and event spaces)	FALSE	Direct survey, interviews, and questionnaires	Observational, interviews			
	Territorial attractiveness initiatives	Activation of territorial attractiveness initiatives (events, exhibitions, and information activities)	FALSE	Station event planning and interviews	Documentary, interviews			
	Services for people in vulnerable conditions	Presence of services or help desks for people in vulnerable conditions (minors, homeless people, listening centres, housing support, and disability support)	FALSE	Station services analysis and interviews	Documentary, participatory			

D. SPATIAL QUALITY

Criterion	Indicator	Evidence	Assessment	Data source	Data type	No. of indicators satisfied	% indicators satisfied	Outcome
D1. Maintenance condition and physical integrity	Structural integrity of buildings and canopies	Absence of evident structural decay in passenger buildings	FALSE	Direct survey, specialist investigations, and technical documentation	Cartographic, documentary	0	0%	LOW
	Seismic upgrading of buildings and canopies	Compliance with current seismic regulations	FALSE	Direct survey, specialist investigations, and technical documentation	Cartographic, documentary			
	Disused spaces	Absence of unused or abandoned spaces	FALSE	Direct survey	Observational			
	Conservation of materials and finishes	Absence of visibly obsolete or deteriorated materials or finishes	FALSE	Direct survey and specialist investigations	Observational, documentary			
D2. Perceptual quality of the station building	Information systems	Presence of an integrated audio-visual information system	TRUE	Direct survey	Observational	2	50%	MEDIUM
	Waiting areas	Presence of adequately sized and covered waiting areas	FALSE	Spatial analysis, direct survey, and questionnaires	Observational, interviews			
	Signage	Clarity of access points and connections	FALSE	Direct survey	Observational			
	Continuity and usability from outside	Visual continuity between the station and the external public space	TRUE	Direct survey and questionnaires	Observational, interviews			
D3. Quality of adjacent public spaces	Public spaces	Presence of usable public spaces (squares, gardens, and pedestrian routes)	TRUE	Direct survey, cartographic analysis	Observational, documentary	2	66.67%	MEDIUM
	Degradation of public spaces	Absence of visibly degraded public spaces immediately adjacent to the station	FALSE	Direct survey	Observational			
	Disused properties	Absence of abandoned or underutilised buildings near the station	TRUE	Direct survey, FN documentation	Observational, documentary			

Tabb. 2c, 2d | Multi-criteria analysis checklist and application to Milano Cadorna station (credit: the Authors, 2026).

E. SAFETY AND SURVEILLANCE

Criterion	Indicator	Evidence	Assessment	Data source	Data type	No. of indicators satisfied	% indicators satisfied	Outcome
E1. Perceived safety and lighting	Lighting of internal spaces	Presence of adequate lighting in the internal spaces of the passenger building	TRUE	Direct survey, cartographic analysis	Observational, documentary	2	50%	MEDIUM
	Lighting of external spaces	Presence of adequate lighting in external spaces (square, car parks, underpasses, and platforms)	FALSE	Direct survey, cartographic analysis	Observational, documentary			
	Functional presence	Presence of activities and services operating throughout the day	TRUE	Direct survey, commercial data analysis, and FN space leasing	Observational, documentary			
	Blind spots	Absence of blind spots or spaces that are not visible along the main routes	FALSE	Direct survey	Observational			
E2. Control and management systems	Vide surveillance	Presence of video surveillance systems	TRUE	Official FN documentation, interviews	Observational, participatory	3	75%	HIGH
	Staff and active forms of presence	Presence of staff or active forms of presence, including shared arrangements with other bodies	TRUE	Direct survey, interviews, and FN management documentation	Observational, participatory			
	Emergency procedures	Presence of clearly signposted emergency procedures	FALSE	Direct survey, FN safety documentation	Observational, documentary			
	Closing and protection systems	Presence of systems for closing or regulating access at night	TRUE	Direct survey and interviews	Observational, interviews			

Tab. 2e | Multi-criteria analysis checklist and application to Milano Cadorna station (credit: the Authors, 2026).

valorizzazione patrimoniale, l'adeguamento infrastrutturale, la sostenibilità economica e le funzioni di prossimità, non sempre convergenti.

L'applicazione del metodo multicriteriale ha mostrato come tali sinergie generino inevitabili compromessi: l'incremento dell'intermodalità comporta ridefinizioni spaziali complesse; l'inserimento di nuove funzioni di prossimità può entrare in tensione con i modelli di valorizzazione immobiliare; la tutela del Patrimonio storico può limitare interventi di efficientamento energetico o ampliamento volumetrico. La lettura per macroaree consente di rendere esplicite tali dinamiche e di orientare scelte programmatiche consapevoli su scala di rete, integrando innovazione infrastrutturale e attenzione alla coesione territoriale. Questa impostazione si avvicina agli approcci di previsione strategica urbana che, a scala europea, enfatizzano la costruzione di visioni condivise e di scenari di lungo periodo per le infrastrutture e i territori (Mantziaras, 2024).

I limiti dello studio sono legati alla diversa maturità operativa delle stazioni analizzate: mentre alcuni nodi presentano programmi già avviati, molte stazioni si collocano ancora in fase di visione strategica, rendendo verificabile il metodo soprattutto in termini di orientamento programmatico e non ancora di monitoraggio ex post degli esiti. Attualmente il metodo è stato applicato solo al caso di Cadorna, ma è in corso di validazione sulle stazioni dell'hinterland milanese della linea Milano-Saronno. Ulteriori criticità riguardano la disponibilità e l'omogeneità dei dati, non sempre garantite in contesti meno strutturati, nonché la scelta di privilegiare una valutazione qualitativa multicriteriale, che favorisce l'applicabilità e l'adattabilità, ma non consente una misurazione quantitativa standardizzata degli impatti.

La diffusione di un approccio sistemico alla rigenerazione delle stazioni incontra inoltre barriere di natura culturale, economica e istituzionale. Permane una lettura della stazione come mera infrastruttura tecnica, mentre la frammentazione proprietaria e la rigidità dei modelli concessori possono ostacolare interventi integrati; la complessità normativa e la presenza di vincoli di tutela richiedono forme di governance multilivello stabili e coordinate. In tale quadro il metodo proposto si configura come strumento adattabile a reti ferroviarie regionali caratterizzate da Patrimoni diffusi e strutture concessorie analoghe, grazie alla sua articolazione modulare – mappatura, checklist, analisi mirate e partecipazione – che consente comparabilità su scala di rete e flessibilità nei diversi contesti.

In relazione agli obiettivi di sviluppo sostenibile l'approccio metodologico proposto contribuisce direttamente al rafforzamento delle infrastrutture resilienti (SDG 9), alla riduzione delle disuguaglianze territoriali (SDG 10), alla qualità urbana e alla rigenerazione sostenibile (SDG 11) e alla mitigazione degli impatti ambientali (SDG 13). Tali contributi si accompagnano a effetti indiretti su altri ambiti, in particolare sul benessere urbano (SDG 3), sull'accesso equo ai servizi e alle opportunità (SDG 1), sulla qualità degli spazi pubblici e dell'abitare (SDG 16) e sul rafforzamento di forme di cooperazione tra attori pubblici e privati (SDG 17), generando sinergie tra mobilità, spazio pubblico e inclusione sociale. Al contempo l'approccio metodologico evidenzia possibili compromessi tra efficienza economica, tutela del Patrimonio e obiettivi ambientali, la cui gestione richiede adeguati livelli di governance, disponibilità di dati e coordinamento tra gli attori coinvolti.

Conclusioni | La ricerca contribuisce al dibattito sulla rigenerazione delle stazioni ferroviarie proponendo una loro lettura come infrastrutture territoriali di prossimità, capaci di integrare dimensione infrastrutturale, qualità spaziale, servizi e inclusione sociale su scala di rete. In particolare il contributo introduce un metodo multicriteriale che traduce in forma operativa le principali dimensioni emerse dalla letteratura recente sulla 'rigenerazione delle aree delle stazioni' rispetto a intermodalità, prossimità, sostenibilità e governance, superando approcci settoriali e proponendo una struttura comparativa applicabile a contesti eterogenei.

In un contesto quale quello europeo e italiano, caratterizzato dalla presenza diffusa di stazioni che richiedono interventi di adeguamento infrastrutturale, funzionale e ambientale, l'approccio metodologico presentato consente di passare da una lettura descrittiva delle criticità a una loro organizzazione in priorità e in indirizzi operativi, supportando processi decisionali più consapevoli nella programmazione degli interventi. In questo senso il contributo si configura non solo come strumento analitico, ma anche come dispositivo di supporto alla pianificazione strategica, capace di connettere le dimensioni infrastrutturale e urbana.

Dal punto di vista della trasferibilità il metodo risulta applicabile a reti ferroviarie caratterizzate da Patrimoni diffusi e da differenti condizioni di governance, grazie alla sua struttura modulare e adattabile. La sua applicazione richiede tuttavia alcune condizioni di base, quali la disponibilità di dati minimi, la presenza di sistemi di classificazione e la collaborazione tra i soggetti gestori, le Amministrazioni locali e gli attori territoriali.

Sul piano dell'agenda di ricerca lo studio apre ulteriori sviluppi, in particolare nell'integrazione di indicatori qualitativi e quantitativi nell'analisi e nella valutazione di manufatti esistenti, nell'approfondimento dei modelli di governance multilivello per la gestione dei processi di rigenerazione urbana e ferroviaria, nella definizione di sistemi di monitoraggio ex post degli impatti sociali e ambientali e infine

nell'approfondimento di metodi e processi per il riuso adattivo di spazi e patrimoni ferroviari in trasformazione. In tale prospettiva le stazioni ferroviarie si configurano come dispositivi centrali per la transizione ecologica e sociale delle città contemporanee, contribuendo a orientare le politiche verso sistemi di mobilità più equi, spazi pubblici più inclusivi e una maggiore coesione territoriale.

Since their nineteenth-century expansion, railway networks and their infrastructural nodes have constituted devices that have shaped the European urban structure, organising spatial, economic, and social relationships at the territorial scale. In contemporary contexts, these nodes are no longer exclusively places of transit, but rather multi-scalar environments required to redefine their role across technical efficiency, the quality of public space, and new demands for inclusion and sustainability, within a renewed relationship between infrastructure and city. Railway stations have progressively expanded their functions and urban meanings, evolving from monumental logistical nodes and catalysts of nineteenth-century industrial growth (Meeks, 1995; Bertolini and Spit, 1998) to multifunctional hubs and actors in territorial regeneration from the 1980s and 1990s onwards (Cervero, 1998; Bertolini, 1996; 1999; Peters and Novy, 2012).

The literature review was conducted through the analysis of recent scientific contributions and national and international institutional documents on the regeneration of stations and mobility systems, selected according to the dimensions of accessibility, intermodality, proximity, sustainability, and governance. The review aimed to identify interpretative and operational models to construct the theoretical framework and define the analytical dimensions underlying the proposed method.

The recent transformation of stations has involved the integration of service and proximity functions, as well as the adoption of standards for social inclusion (Ricci, Poli and Marino, 2025; Cangelli, 2025), in continuity with planning approaches such as Transit-Oriented Development (TOD), which promote mixed-use densification and sustainable accessibility (Cervero, 1998; Bertolini, 1999; Banerjee and Saha, 2022), and with interpretations of the station as a node of inclusion (Canessa and Centanaro, 2024). The paradigm of the 15-minute city has further reinforced the potential of stations as local nodes for essential services, with impacts on quality of life, compatible densification, and the distribution of services across the territory (Ricci, Poli and Marino, 2025; Fiorini et alii, 2025; Otsuka and Reeve, 2024).

In the Italian context, the transformation of railway station areas develops along two main trajectories: the redevelopment of major stations as complex urban devices and the widespread reconversion of the existing heritage through practices of social reuse and proximity micro-hubs (RFI, 2015, 2022). Italian literature has primarily focused on assessing the regenerative potential of stations in relation to urban policies and the symbolic and functional transformations of station spaces (Conticelli, 2011; Paone, 2023), while the diffusion of participatory practices has strengthened the role of local actors in defining public spaces and welfare services connected to stations (Campagnaro et alii, 2025).

Over the last two decades, digitalisation and increasing attention to sustainability have accelerated this transformation: smart upgrading processes (sensors, electronic ticketing, and information systems) and integrated mobility solutions (bike-sharing, park-and-ride facilities, and shared mobility) have improved operational efficiency and user experience, in line with policies aimed at reducing emissions and regenerating public spaces (UIC, 2017; Griffin and Sener, 2016; ITF, 2015; European Commission, 2011).

Within this perspective, some studies have highlighted how the future of stations is characterised by a progressive blurring of boundaries between building and city, between public space and infrastructure, configuring multimodal nodes as porous environments that place people at the centre and are capable of integrating urban functions, services, and digital systems (ARUP, 2019, 2020). The station has progressively been considered a key actor in citizens' active mobility, contributing to the development of neighbourhoods and more equitable contexts (ARUP, 2022): recent experiences highlight the role of small hubs and multi-

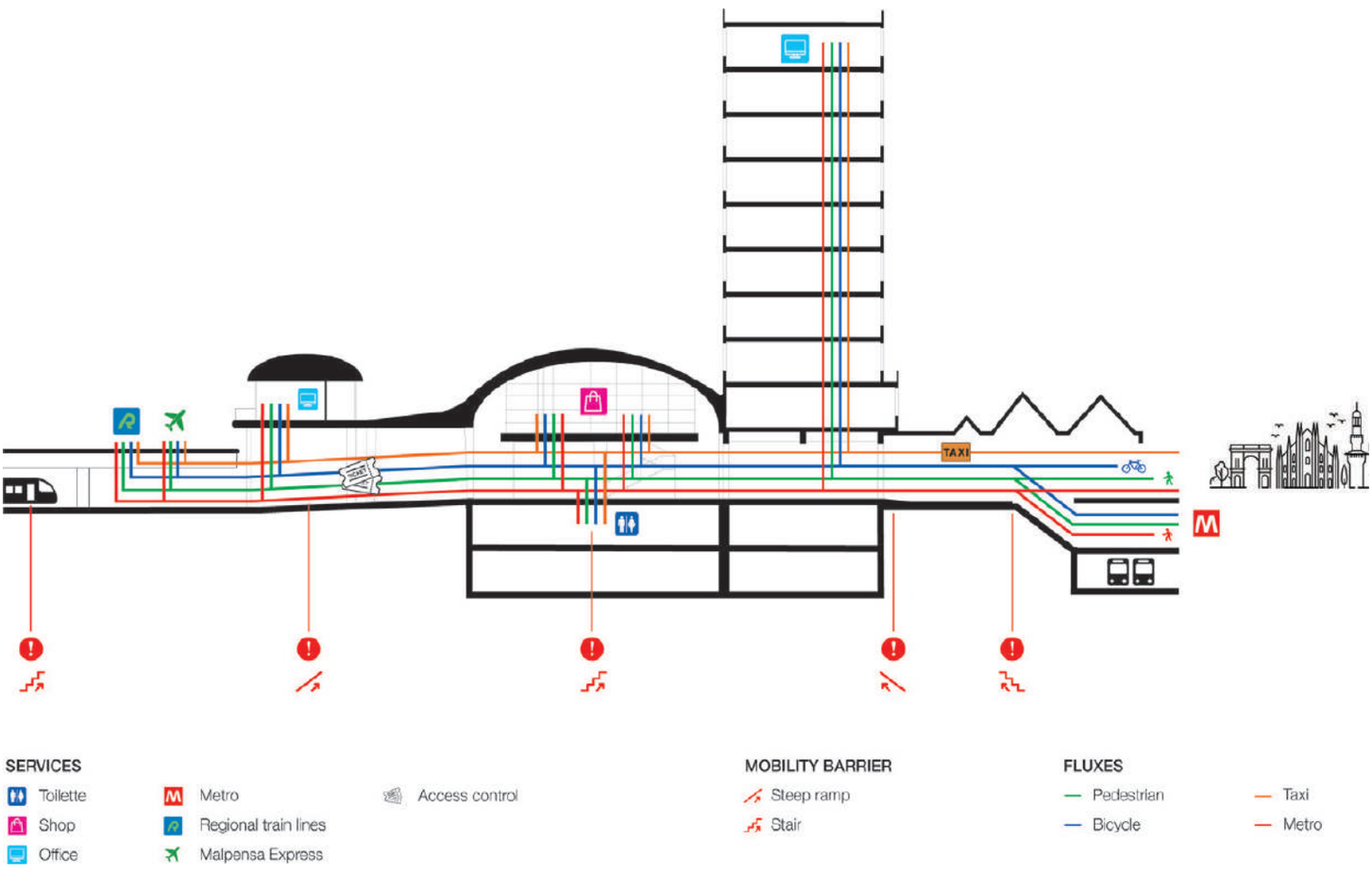


Fig. 9 | Milano Cadorna Station: section of the station and diagram of flows and accessibility (credit: the Authors, 2026).

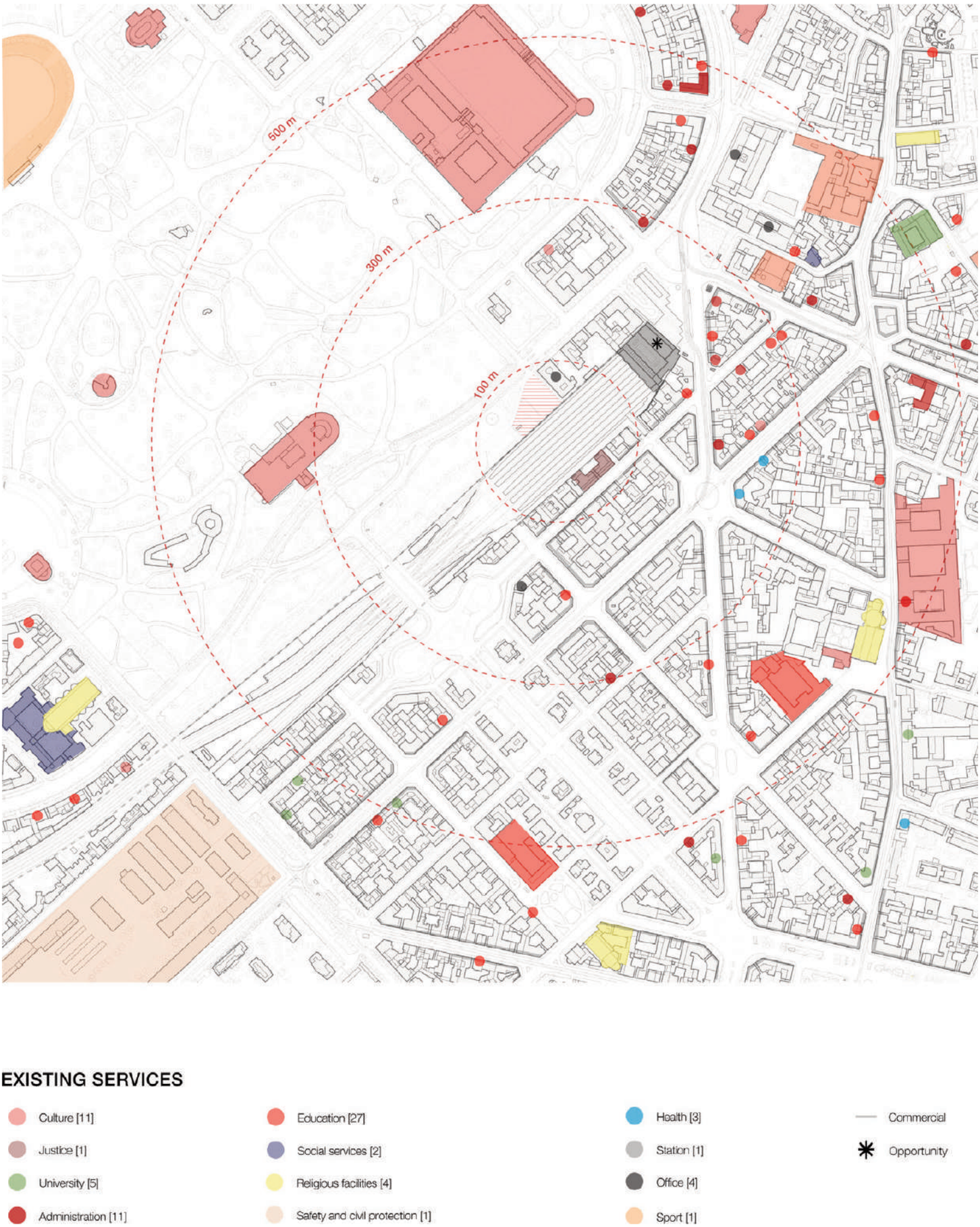


Fig. 10 | Map of the urban context of Milano Cadorna station with services and main urban public functions (credit: the Authors, 2026).

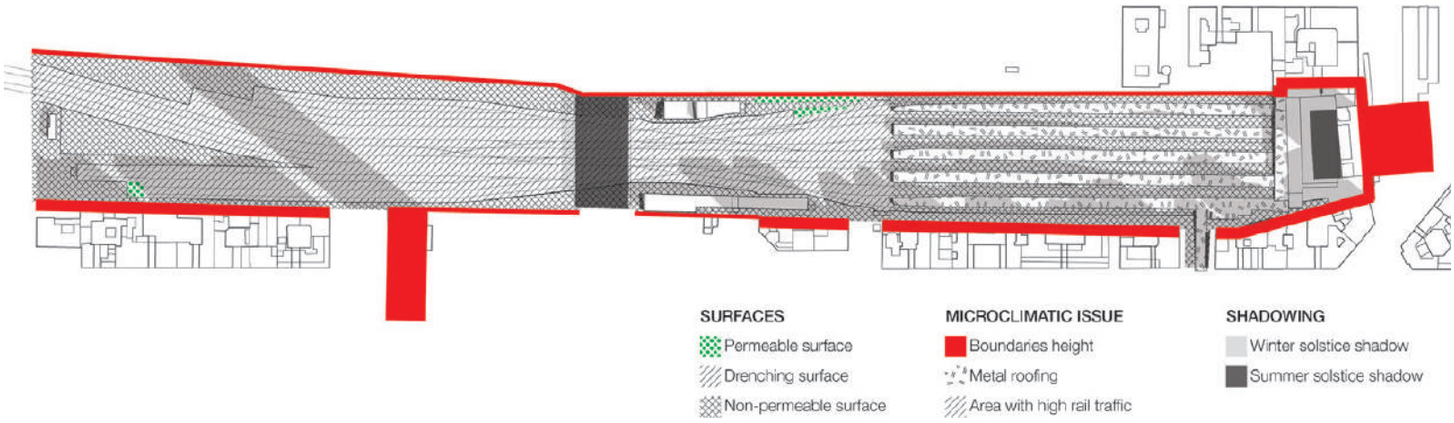


Fig. 11 | Map of impermeable surfaces and microclimatic criticalities (credit: the Authors, 2026).

functional micromobility devices as infrastructures connecting the railway node, public space, and urban services (Fabbri, 2023).

Empirical and analytical evidence indicate that infrastructural configurations and regeneration policies can contribute to spatial justice and sustainable development (Fiorini et alii, 2025; Cangelli, 2025), while participatory practices and civic presences reinforce the social and identity-related role of stations (Bertolini, le Clercq and Kapoen, 2005; Campagnaro et alii, 2025; Setola and Borgianni, 2025). However, significant challenges remain: the management and perception of safety, the reconciliation between heritage conservation and functional modernisation, the complexity of multi-level governance for integrated interventions (Berretta, Desideri and Staltari, 2024; Campagnaro et alii, 2025), and the obsolescence of technological systems. Looking ahead, stations are called upon to perform hybrid roles, acting as multimodal nodes and platforms for the ecological and social transition of cities, which requires interdisciplinary approaches for their understanding and governance (Bertolini, 1999; Cervero, 1998). Unlike perspectives that interpret the station primarily as a node (TOD, node-place model) or as a civic facility (social reuse), this contribution conceives the station as a territorial infrastructure of proximity, understood a spatial and social device distributed across the network scale. The originality of the paper lies in the proposal of a multi-criteria and multi-scalar tool that integrates infrastructural, spatial, and social dimensions into a comparative instrument oriented towards planning, bridging the gap between approaches focused solely on infrastructural performance and practices centred on localised social reuse. The study thus positions itself within the broader debate on smart and sustainable mobility infrastructures as a new system of urban connections, requiring the integration of technical performance, spatial quality, and environmental objectives (Bruno et alii, 2024).

In light of the outlined framework, the contribution presents the results of a research project aimed at interpreting railway stations as territorial infrastructures of proximity at the network scale, through the development of a tool applied to the Lombardy station system and tested in the case of Milano Cadorna (Italy). The research pursues three main objectives: 1) to construct a comparable knowledge framework of stations based on infrastructural, spatial, and social dimensions; 2) to define a multi-criteria and multi-scalar tool capable of guiding regeneration choices; 3) to verify its effectiveness, through a complex case study, in supporting shared decision-making processes.

The methodological process is structured into three integrated phases: knowledge mapping of the Lombardy network; multi-criteria evaluation of stations; application to the Milano Cadorna case. Consistent with this structure, the text develops through a process that, after comparing selected European and Italian experiences of station regeneration, frames the Lombardy system as the field of application, presents the developed method, tests its operational applicability through the Milano Cadorna case study, and finally discusses the results in terms of critical issues, opportunities, and transferability.

Within this perspective, the contribution aims to offer the scientific community both a conceptual and an operational framework for interpreting stations as components of a distributed territorial infrastructure and for guiding their regeneration through a comparative, replicable tool. The contribution of the study lies, in particular, in the possibility of connecting systemic analysis, multi-criteria evaluation, and the definition of operational guidelines, thereby supporting policies and projects within a perspective of territorial equity, infrastructural integration, and the quality of public space.

Comparative experiences in station regeneration | The international and national reference cases were selected as expressions of two trajectories that are currently significant in European and Italian railway regeneration: on the one hand, models oriented towards the integration between infrastructure, urban development, and the quality of public space; on the other, models centred on social reuse and the widespread reactivation of existing heritage. In particular, the case of the Dutch railway system was selected because the Netherlands represents one of the most structured laboratories for the integration of transport and urban development, as demonstrated by the extensive scientific literature and abundant available documentation.

The comparison was conducted according to homogeneous criteria in order to identify the methodological dimensions most useful for constructing the proposed framework. The theoretical foundation of this approach lies in the node-place model developed by Bertolini (1996; 1999), which interprets the station as a device where infrastructural accessibility (node value) and urban functional intensity (place value) intersect. The model, further developed and applied in the Dutch context by Peek, Bertolini and De Jonge (2006), has guided integrated planning policies and the evaluation of the development potential of station areas. The literature shows that this process is neither episodic nor recent: several studies document a phase of maturation characterised by the integration of infrastructural redevelopment, real estate development, and new urban functions (Bruinsma, 2009). From a comparative perspective, Peters and Novy (2012) situate these interventions within the broader framework of railway station area regeneration megaprojects, highlighting the potential tension between the sustainability of transport systems and urban competitiveness.

The Dutch model is based on a structured governance system involving Nederlandse Spoorwegen (NS), responsible for managing the property assets, and ProRail, the infrastructure manager, supported by policy tools such as Spoorbeeld and Het Stationsconcept[1] (Bureau Spoorbouwmeester, 2025). The NS Annual Reports (Nederlandse Spoorwegen, 2024) and the Transport Plan 2025 (Nederlandse Spoorwegen, 2025) demonstrate a network-based strategy oriented towards intermodality, spatial quality, and sustainability, applied to over 400 stations. Within these documents, the role of stations is reinterpreted as a catalyst for local public space, capable of fostering interactions between public mobility, cycling, services, and urban functions in proximity to railway nodes. From this framework, recurring operational dimensions emerge: multimodal accessibility, integration with urban public space, territorial attractiveness, environmental and spatial quality, circularity and sustainability, functional mix, and multi-level governance.

In the Italian context, the trajectory develops in different ways. Following the centralisation of control systems and the reduction of physical presence in stations, Rete Ferroviaria Italiana (RFI, 2015) initiated a policy of property reuse through the Stazioni Impresenziate Programme, which activates reconversion processes by granting free-use agreements to local authorities and third-sector organisations. In this framework, the station serves as

a territorial facility and civic infrastructure, hosting cultural, social, and proximity services. The report by Zandonai (2015) interprets these experiences as the activation of community assets, structuring the reuse cycle into phases that include governance, economic sustainability, and impact evaluation. From this perspective, regeneration cannot be reduced to mere physical redevelopment but is a process of social innovation involving public actors, property owners, and civil society organisations, thereby strengthening the station's role as a territorial hub.

The comparison between European and Italian experiences highlights two complementary trajectories: on the one hand, a model oriented towards urban transformation and infrastructural performance, supported by a consolidated theoretical and institutional tradition; on the other, a widespread and socially oriented model centred on heritage reactivation and community innovation (Tab. 1). In particular, the Italian model prioritises the refunctionalisation of spaces, while remaining less structured in strengthening infrastructural elements, intermodality, and environmental sustainability from a network-scale territorial equity perspective.

In light of these findings and recent literature on the regeneration of station areas, there is a need for an approach that integrates infrastructural performance, spatial quality, functional proximity, and network governance. Although these dimensions are widely recognised, in the analysed cases, they are typically addressed sectorally, alternately privileging urban performance or the social reactivation of heritage. Within this framework, the comparison between the two analysed models assumes a foundational role in the construction of the proposed method: their strengths and weaknesses have been translated into operational dimensions and subsequently integrated into the panel of indicators, defined based on the analysed documentation. The contribution therefore proposes an interpretation of stations as a distributed territorial infrastructure, translating theoretical references on proximity, multimodality, and governance into a multi-criteria tool applicable to the Italian context.

The Lombardy station system as a territorial infrastructure | In recent years, the Lombardy Region has launched initiatives to enhance the railway station system, strengthening its role as recognisable nodes, functionally integrated within sustainable mobility and urban regeneration policies. The scale of railway infrastructure across the regional territory is significant: the network extends for approximately 2,000 km and includes 464 stations, of which 125 (some inactive) are under direct regional management and entrusted under concession to Ferrovie Nord (FN), while the remaining stations are managed by Rete Ferroviaria Italiana (RFI) and Ferrovie Emilia-Romagna (FER). In 2023, the Lombardy Region promoted a study on the development and enhancement of the railway station system and the design of operational tools (SINLOC, 2023), aimed at identifying operational models and replicable tools for the refunctionalisation of the existing heritage, with particular attention to the growing number of unattended stations[2]. The study recognises a new public-interest vocation for stations, to be implemented through the involvement of municipal administrations and the activation of new services and proximity functions, especially in less-served areas. The approach prioritises adaptive reuse strategies that are lightweight and reversible, oriented towards the conservation of existing heritage and environmental and social sustainability.

Within this framework, the network managed by FN[3] represents a significant portion of the overall Lombardy railway system, dating back to the late nineteenth century and branching into the so-called Milano Branch and Iseo Branch. The Strategic Plan of Ferrovie Nord Milano 2024-2029 (FNM, 2024a) identifies the railway network as a central infrastructural asset, envisaging investments in upgrading and modernisation aimed at improving safety, efficiency, service quality, and environmental sustainability, also from a sustainable-mobility perspective. In this context, the network is con-

Macro-area	Criterion	No. of indicators	No. of indicators satisfied	% indicators satisfied	Outcome
A. Multimodality and accessibility	A1	6	5	83.33%	HIGH
	A2	5	0	0%	LOW
	A3	3	1	33.33%	LOW
				38.89%	**MEDIUM**
B. Functionality and proximity	B1	5	4	80%	HIGH
	B2	4	1	25%	LOW
	B3	3	3	100%	HIGH
				68.33%	**HIGH**
C. Environmental and social sustainability	C1	5	0	0%	LOW
	C2	3	1	33.33%	LOW
	C3	6	2	33.33%	LOW
				22.22%	**LOW**
D. Spatial quality	D1	4	0	0%	LOW
	D2	4	2	50%	MEDIUM
	D3	3	2	66.67%	MEDIUM
				38.89%	**MEDIUM**
E. Safety and surveillance	E1	4	2	50%	MEDIUM
	E2	4	3	75%	HIGH
				62.50%	**MEDIUM**

Tab. 3 | Summary table of the results of the checklist for Milano Cadorna Station (credit: the Authors, 2026).

Type of analysis	Responsible party	Objective of the analysis	Output	Impact on decisions
Analysis of the area's historical and architectural characteristics	Politecnico di Milano	Representation of the historical stratification and specific characteristics of the buildings	Evidence of portions dating back to the 1940s	Operational guidelines consistent with historical elements from different periods and with the stratification of the buildings
Analysis of the area's management characteristics	Politecnico di Milano + Ferrovie Nord	Representation of the organisational processes of station spaces and related performance indicators	Reconstruction of existing management models and identification of inefficiencies and critical issues in the use of space	Support for the rationalisation of spaces, the redefinition of functions, and the optimisation of services
Analysis of mobility flows and intermodality	Specialist consultant	Evaluation of origin–destination movements of people and/or vehicles, with a description of volumes, directions, and temporal variables	Identification of traffic congestion points, the need to implement mobility services, and improvement scenarios	Definition of interventions for flow management, improved accessibility, and enhanced mobility services
Static and seismic assessment	Specialist consultant	Evaluation of structural safety under design seismic loads	Non-compliance with current regulations	Need for seismic upgrading in the event of interventions on the passenger building
Structural analysis	Specialist consultant	Structural behaviour of the building under gravitational forces and operating loads	Static equilibrium in the absence of interventions; critical issues in the event of structural modifications and partial demolitions	Definition of design alternatives compatible with any structural interventions
Archaeological analysis	Specialist consultant	Reconstruction of the archaeological potential in the area	Absence of significant archaeological evidence	No direct impact on decisions
Geophysical and geognostic analyses	Specialist consultant	Representation of the stratigraphic and geotechnical composition of the subsoil	Absence of significant geotechnical criticalities	No direct impact on decisions
Topographic survey	Specialist consultant	Representation of the current state of the structures and their geometric configuration	Survey of site conditions and digital cartographic bases	Knowledge base for subsequent design and construction phases

Tab. 4 | Matrix of sub-areas, critical issues, and actions for the areas of Milano Cadorna station (credit: the Authors, 2026).

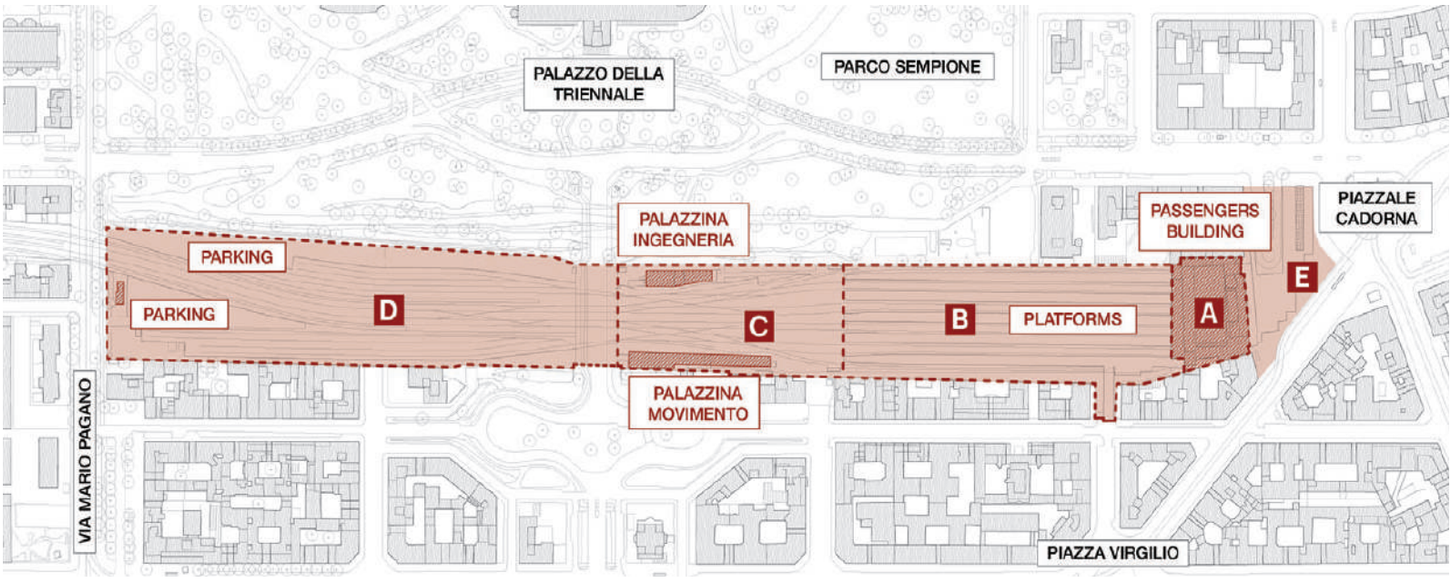


Fig. 12 | Reference sub-areas of Milano Cadorna station (credit: the Authors, 2026).

ceived as the backbone of an integrated regional mobility system, whose sustainability has recently been addressed in the Sustainability Report (Trenord, 2024), which aims to improve environmental quality and circularity at stations and in railway services.

Among the priority interventions is the FILI project, an integrated transformation programme along the Milano-Malpensa axis that involves the main nodes of the network (Milano Cadorna, Bovisa, Saronno, and Busto Arsizio) and their surrounding areas. The project operates at the scale of an infrastructural corridor, structuring actions across three levels: the regeneration of railway nodes, the development of the Milano-Malpensa cycle superhighway (54 km), and environmental interventions, including reforestation along the corridor. FILI interprets the railway network as a territorial backbone, integrating rail mobility, soft mobility, and ecological continuity, thereby reinforcing the railway's interpretation as an integrated urban and territorial infrastructure (FNM, 2024b).

Overall, the initiatives promoted by the Lombardy Region and the companies of the Ferrovie Nord Milano Group outline a development strategy that recognises the railway network and its stations as structural elements for regional accessibility, ecological transition, and territorial equity. The institutional interest in coordinated, multi-scalar, and replicable interventions confirms the centrality of stations as strategic territorial devices, opening the way for methodological tools that can systematically support these transformation processes.

A systemic method for the regeneration of stations as proximity infrastructures | Within this

A | PASSENGER BUILDING

Macro-area	Criterion	Critical issues identified by the checklist	Operational guidelines	Priority level (1–3)
A. Multimodality and accessibility	A1	Poor provision of cycling services and infrastructure	Increase cycling services and strengthen connections to the urban network	3
	A2	The station lacks tactile pathways for visually impaired users, differentiated access routes to the platforms for different types of users, and an adequate access control system, resulting in congestion in the concourse at certain times	Install LOGES tactile routes, diversify access, and upgrade the control system	3
B. Functionality and proximity	B1	There are no waiting areas for travellers inside the building	Create waiting areas that meet current standards	3
	B2	There are no spaces dedicated to cultural, social, or local development services	Include civic services and spaces for cultural and social activities	2
C. Environmental and social sustainability	C1	The facility's environmental performance does not include the production or use of energy from renewable sources, rainwater management, or the adoption of microclimatic mitigation techniques	Integrate energy systems and solutions for water management and environmental mitigation	3
	C2	The station does not feature low-impact design solutions or environmental certifications	Introduce sustainable, low-impact design solutions	2
	C3	There are no participatory co-design processes in place, no spaces dedicated to meeting and development initiatives, and no help desks for vulnerable groups	Activate co-design processes and include spaces for social purposes and support for vulnerable groups	2
D. Spatial quality	D1	The maintenance condition shows widespread visual deterioration, with obsolete materials and deteriorated finishes, along with underutilised spaces. The building requires seismic and structural upgrading	Refurbish materials and spaces, and plan structural adaptations	3
	D2	The waiting areas are inadequately sized and lack the necessary equipment, and the signage is confusing	Improve waiting areas and reorganise information systems	3
	D3	The covered access area to the station and the square in front are in a dilapidated condition	Redevelop the public space of the square and improve urban quality	3
E. Safety and surveillance	E1	The concourse has numerous blind spots, especially in the mezzanine and in the spaces created by the central volumes	Eliminate blind and underused areas resulting from the central volumes and the mezzanine	3
	E2	Safety signage is undersized and inadequately marked	Integrate and improve safety signage	3

B | PLATFORMS

Macro-area	Criterion	Critical issues identified	Operational guidelines	Priority level (1–3)
A. Multimodality and accessibility	A2	Accessibility is incomplete because the platform height does not meet the standards of trains in circulation, and because tactile pathways for visually impaired users are absent	Install LOGES tactile pathways for visually impaired users, and adjust platform height to the entrance height of trains in circulation	3
	A3	The existing underpass does not connect the tracks to the surrounding areas outside the station area and is closed to passenger traffic	Assess the opening and integration of the underpass into the city	1
B. Functionality and proximity	B1	The platforms do not have seating for waiting passengers	Install adequate seating for waiting passengers	2
C. Environmental and social sustainability	C1	The canopies do not provide energy production from renewable sources or rainwater management	Assess the installation of solar panels on the canopies and the integration of a rainwater recycling system	3
	C2	The canopies and platforms do not include low-impact environmental design solutions	Develop low-impact design solutions	2
D. Spatial quality	D1	The platforms and canopies are clearly in disrepair, with deteriorated and obsolete materials and finishes	Refurbish or replace the canopies	3
E. Safety and surveillance	E1	Canopy lighting is inadequate	Integrate adaptive lighting systems	3
	E2	Safety signage is undersized and inadequately signposted	Improve signage	3

Tab. 5a, 5b | Operational guidelines and priority actions for the regeneration of the sub-areas of Milano Cadorna station, defined in relation to the multi-criteria assessment and the positioning matrix. Priority level: 1 = high; 2 = medium; 3 = low (credit: the Authors, 2026).

framework, the research proposes an operational method to guide the transformation of railway station areas managed by Ferrovie Nord and their surrounding spaces as nodes of a renewed, capillary infrastructure of proximity and territorial equity. The station is therefore understood not only as a technical artefact, but as a component of an intelligent and sustainable territorial mobility infrastructure, in continuity with approaches that interpret urban connections as integrated systems of transport, public space, and sustainability (Bruno et alii, 2024). The method is structured into three integrated phases: analytical-cognitive, strategic-programmatic, and application-oriented. The first analytical-cognitive phase consists of systematically mapping the railway heritage of the Lombardy lines managed by Ferrovie Nord. The analysis aims to collect data on the architectural and infrastructural typologies of stations[4], passenger flows, the functional ranking system used by the operator[5], and the condition of the built assets (refurbished or requiring refurbishment), in order to produce, through mapping, a structured knowledge framework at the network scale. At the same time, underused or residual spaces within station buildings and adjacent structures are catalogued in order to identify potential areas for activation. The outcome of this phase is the construction of a territorial and typological database that supports a comparative and multi-scalar interpretation of stations (Figg. 1-3). The second strategic-programmatic phase develops a multi-criteria analysis and evaluation tool, which constitutes the operational core of the me-

thod. This methodological framework aligns with approaches to urban strategic foresight that operate across multiple scales, guiding scenarios and intervention priorities rather than isolated projects (Mantziaras, 2024).

The multi-scalar tool integrates urban, infrastructural, architectural, managerial, and social dimensions and comprises four elements to be assessed in an integrated manner:
1) Pre-evaluation with positioning, which incorporates classifications developed during the mapping phase and integrates them with the territorial context (urban, peri-urban, extra-urban); the pre-evaluation calibrates the application of the checklist according to the station profile and defines the required level of detail;
2) Multi-criteria checklist, structured into five macro-areas (accessibility and multimodality; functionality and proximity; environmental and social sustainability; spatial quality; safety and surveillance), each articulated into specific criteria, representing the main qualitative evaluation tool; the macro-areas, criteria, and indicators derive from a systematic review of scientific literature on station regeneration processes, as well as from the analysis of institutional, international and national documents and operational frameworks[6]; the indicators were validated through dialogue with infrastructure managers and territorial stakeholders; the checklist can be applied uniformly across all stations in the network, and the level of indicator fulfilment is assessed qualitatively as high, medium, or low[7];
3) Targeted technical-specialist analyses, activated selectively in support of the checklist, including surveys of the existing condition, constraint analysis, analysis of historical and architectural characteristics, flow analysis, and management-related analyses, as well as further technical investigations where necessary;
4) Multi-level participatory tools, integrated into the evaluation phase and articulated across two levels; the first level involves governance-related participation tools such as interviews, focus groups, and working tables with local and supra-local stakeholders, aimed at fostering dialogue and developing shared policies; the second level directly involves station users and the wider population through questionnaires and co-design workshops[8]; the outcomes of these participatory processes inform the definition of needs and the identification of priorities.

The outcome of the second phase is a profile structured by macro-areas, providing a qualitative evaluation that highlights critical issues, consolidated aspects, and potential areas for activation. The third application-oriented phase consists of applying the tool to the selected station areas. The results of the strategic-programmatic phase are synthesised into a concise station profile, enabling the prioritisation of interventions according to the station's role within the network, its territorial context, and the condition of its built assets. Based on this interpretation, operational guidelines and transformation scenarios are defined in coherence with the node's configuration. The method

C | 'PALAZZINE'

Macro-area	Criterion	Critical issues identified	Operational guidelines	Priority level (1–3)
A. Multimodality and accessibility	A2	The presence of numerous architectural barriers prevents universal accessibility	Eliminate architectural barriers	3
	A3	Numerous physical barriers impede integrated circulation between buildings, surrounding areas, car parks, and the station	Improve connectivity between the different parts of the facility	1
C. Environmental and social sustainability	C1	There are no solutions for reducing high levels of noise pollution or mitigating hazards in outdoor spaces	Integrate noise and environmental mitigation systems	3
	C2	The buildings do not feature low-impact design solutions or environmental certifications	Introduce low-impact environmental strategies	2
	C3	There are no dedicated spaces for workers to encourage meeting and socialising during working hours	Include spaces for employee conviviality and well-being	2
D. Spatial quality	D1	The maintenance condition shows widespread visual deterioration, with obsolete materials and deteriorated finishes, along with inadequate spaces	Refurbish and reorganise spaces	3
	D2			
	D3	The surrounding outdoor spaces are deteriorated and underutilised	Improve the quality and use of outdoor spaces	2
E. Safety and surveillance	E1	The presence of blind spots at the rear of buildings reduces perceived safety	Eliminate or redevelop uncontrolled spaces	2

D | PARKING AREA

Macro-area	Criterion	Critical issues identified	Operational guidelines	Priority level (1–3)
A. Multimodality and accessibility	A2	The parking areas are not accessible to people with reduced mobility, and the parking–station connection is not universally accessible	Create accessible pedestrian routes	3
	A3	Urban continuity is interrupted, and there are no access or permeability elements outside the car park entrances	Improve urban connectivity and permeability, and introduce new pedestrian routes	1
C. Environmental and social sustainability	C1	The surfaces of these areas are completely impermeable and contribute to heat-island effects; solutions aimed at reducing high levels of noise pollution and hazards in these areas are inadequate and obsolete; climate mitigation solutions are lacking	Integrate solutions for microclimatic and acoustic mitigation	3
	C2	These areas do not include design solutions or low-impact materials; there is an open-air waste collection point	Introduce sustainable materials and sustainable waste management systems	2
D. Spatial quality	D1	The maintenance condition shows significant visual deterioration	Renovate the spaces	2
	D3	There are dilapidated temporary structures in the underpass	Remove incongruous elements	2
E. Safety and surveillance	E1	Lighting is insufficient and obsolete, and does not ensure an adequate level of perceived safety	Improve lighting systems	3

Tab. 5c, 5d | Operational guidelines and priority actions for the regeneration of the sub-areas of Milano Cadorna station, defined in relation to the multi-criteria assessment and the positioning matrix. Priority level: 1 = high; 2 = medium; 3 = low (credit: the Authors, 2026).

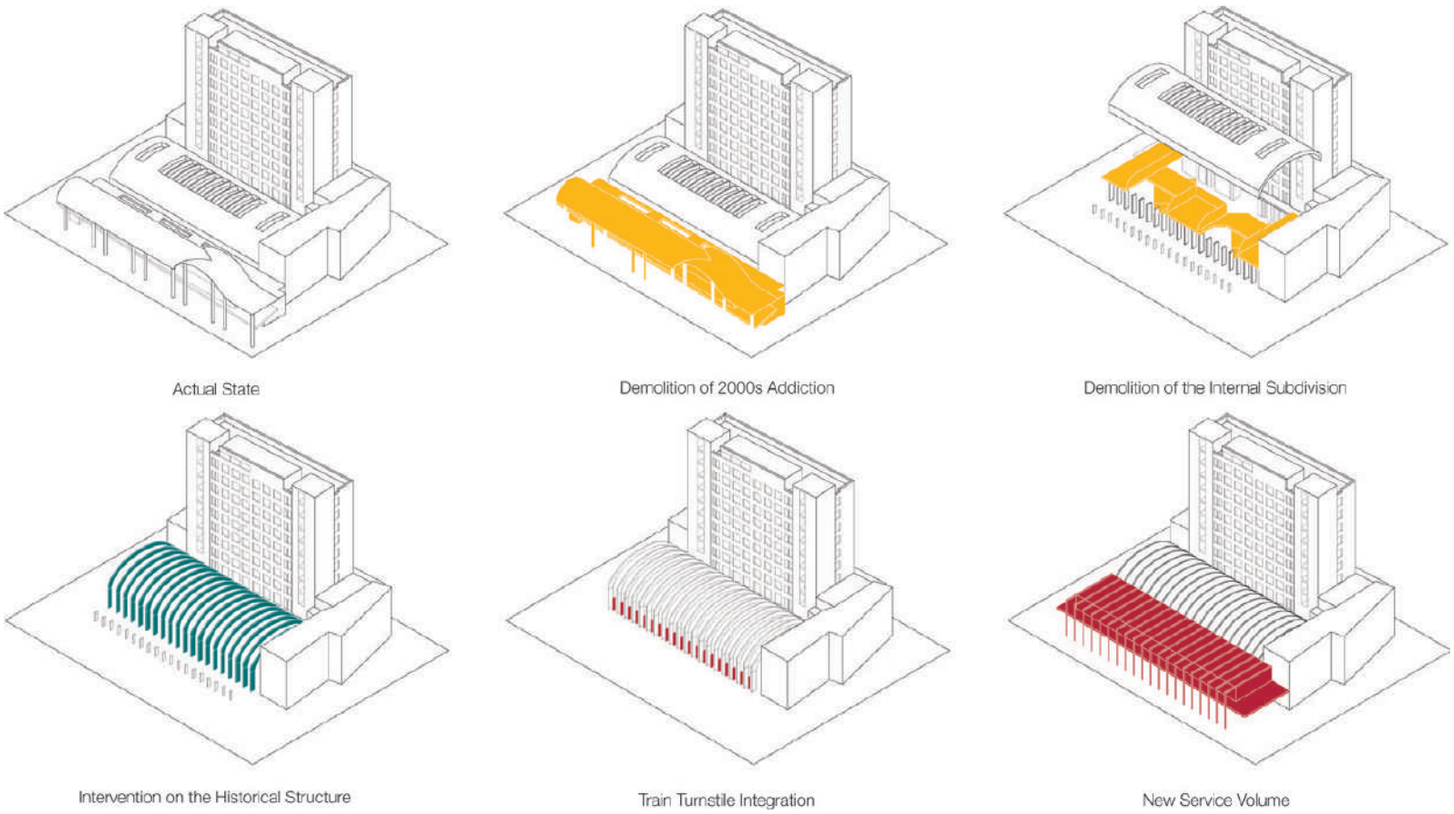


Fig. 13 | Diagrams of possible actions for spatial reorganisation of the passenger building (credit: the Authors, 2026).

thus enables the transition from analytical knowledge of the railway heritage to a selective programming of interventions, ensuring comparability at the network scale and adaptability to individual cases. Although applied to the Lombardy network of Ferrovie Nord, it is transferable to similar contexts: in particular, the three-phase structure, the evaluation of macro-areas, and the integration of analysis, participation, and operational guidelines are transferable, while certain classification tools (ranking systems and internal manuals), and proprietary data remain specific to the Ferrovie Nord context and can be replaced by equivalent systems elsewhere.

Milano Cadorna: a case application | Milano Cadorna station is one of the historical and strategic nodes of the Lombardy railway system. Located in the heart of the Milan urban system, it plays a primary intermodal role, integrating the railway lines of the Milano Branch of Ferrovie Nord, two metro lines, surface public transport, and numerous urban cycling and pedestrian routes. Its historical stratification, consisting of an initial nineteenth-century structure and subsequent transformations carried out during and after the war period, is still legible today in the non-homogeneous architectural features of the complex (Fig. 4). The interventions initiated in the 2000s, including the façade redesign of the building by Gae Aulenti and internal adaptations of the station (Fig. 5), have redefined the contemporary image of the station area. However, critical issues remain concerning spatial quality, flow management, and technological and regulatory upgrading (Cornolò, 2006). Furthermore, there is a need to align the urban regeneration of the entire area with the objectives of the Strategic Plan of the Ferrovie Nord Milano Group (FNM), particularly regarding quality and environmental sustainability (Figg. 6-8). The presented multi-criteria tool was applied to the Cadorna station area.

The pre-evaluation phase classified Cadorna as a modern station, with a platinum ranking and within an urban territorial context. The number of daily passengers amounts to 65,490. The results were based on the indicators and evidence presented in Table 2.

From the perspective of accessibility and intermodality, the station shows a high level of modal integration. However, several critical issues persist in terms of wayfinding and flow management: numerous level differences limit universal accessibility between the metro, the main hall, and platforms, as well as between platforms and trains (Fig. 9). In the macro-area of functionality and proximity, there is a good provision of commercial services and mobility-related facilities, contrasted by a limited presence of civic functions and non-commercial proximity spaces, which would be significant in relation to the reference context (Fig. 10). At the same time, the presence of unused or degraded spaces reveals considerable potential for activation. In terms of environmental and social sustainability, the analysis highlighted significant margins for improvement in external areas, particularly due to extensive impermeable surfaces and poor microclimatic quality (Fig. 11).

The macro-area of spatial quality revealed major critical issues in the passenger building facing Piazzale Cadorna (degraded or underused spaces, perceived congestion, poor organisation of signage, and limited integration of audio-visual systems) and on the platforms (material degradation, and the need for regulatory upgrading). Within the station area, additional railway and office buildings (Palazzina Movimento and Palazzina Ingegneria) are present, whose maintenance condition and proximity to the tracks, particularly the Palazzina Movimento, negatively affect the urban quality of the area. Regarding safety, although the station is almost constantly monitored, critical issues persist in the areas surrounding the square (Tab. 3).

In line with the methodological framework, the profile derived from the checklist was further refined through targeted technical-specialist analyses, triggered by the site's complexity and historical stratification. Given the nature of the case study, the overall evaluation was supported by analyses concerning transport systems, structural conditions, statistical data, and geophysical aspects, aimed at verifying the condition of the existing buildings and the feasibility of potential interventions (Tab. 4).

The participatory phase was structured through institutional working groups involving the various companies of the FNM Group operating within the station and the Lombardy Region, as well as through structured meetings and focus groups. In particular, the working groups were organised by thematic areas and decision-making levels: regional working groups aimed at defining the overall needs framework; technical working groups for analysing the condition of buildings and infrastructure; and meetings with representatives of different departments of the Group (sustainability, functionality, and railway service) to identify specific critical issues and opportunities. This process contributed to the definition of a shared needs frame-

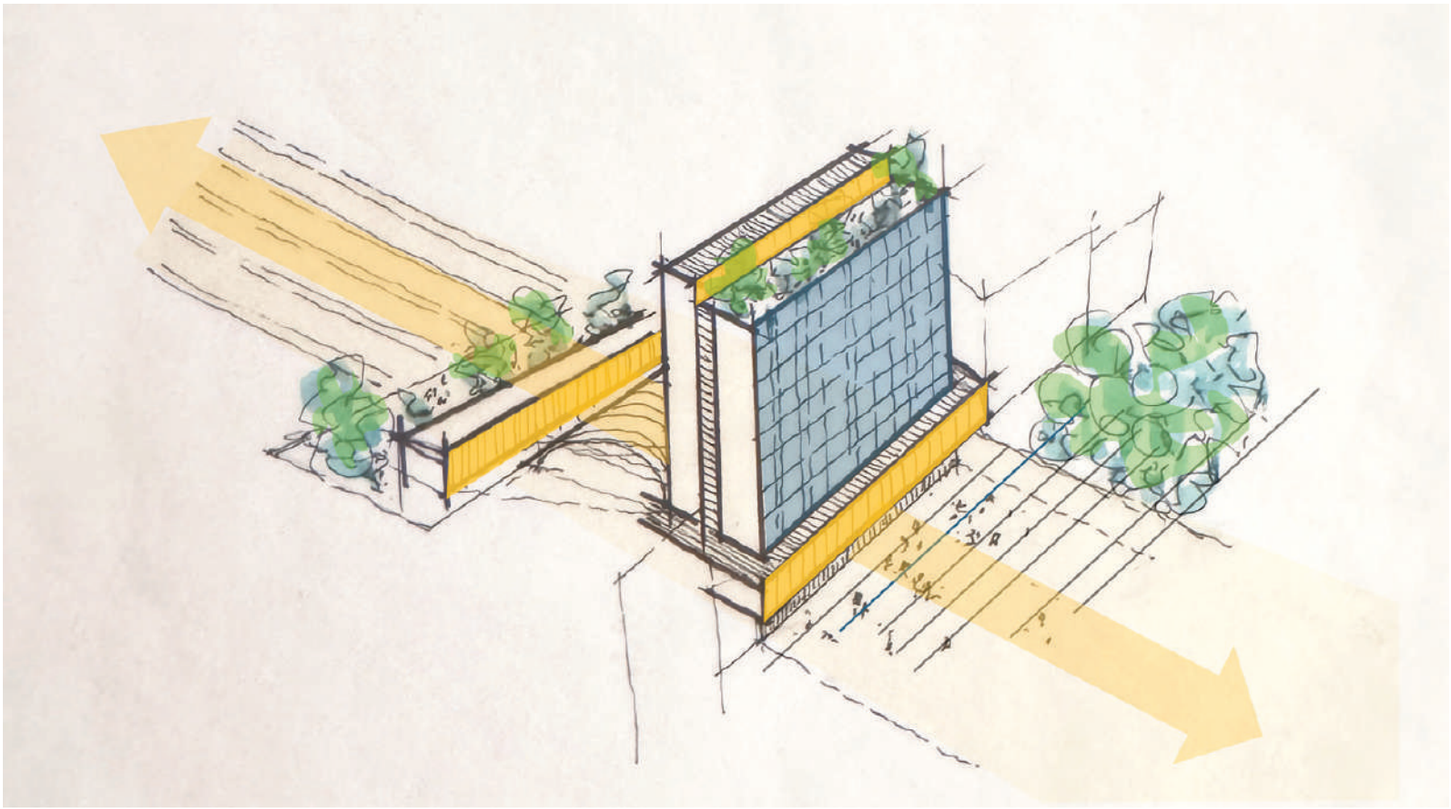


Fig. 14 | Vision sketch of the area (credit: M. P. Vettori, 2026).

work, primarily focused on strengthening multimodality, improving public spaces, and enhancing environmental quality in the station area. Discussions with infrastructure managers highlighted specific spatial and functional needs, configuring Cadorna as a unique case of hybridisation between railway and workplace environments, characterised by a close physical and managerial interrelation. A questionnaire was also prepared for users and for the population frequenting the station area to identify patterns of use and emerging needs.[8]

Finally, the outcomes of the checklist and the technical analyses, based on verifiable evidence, were translated into operational guidelines and intervention priorities. Given the complexity and size of the area (approximately 58,000 m^2), homogeneous sub-areas were identified according to their characteristics and typologies (Fig. 12). For each of these, specific guidelines and priority actions were defined, based on the correlation between the levels identified in the macro-areas and the positioning matrix defined during the pre-evaluation phase (Tab. 5).

For the Passenger Building (Area A – 4,545 m^2), the identified critical issues suggest a functional and spatial reorganisation of the main hall and internal spaces to improve access, flow management, waiting areas, and the reuse of underutilised spaces. Interventions on building volumes and the vaulted roof must be assessed in relation to structural verifications and heritage constraints, integrating conservation requirements with functional upgrading. For the Platform Area (Area B – 14,670 m^2), the analysis indicates the need for interventions to ensure universal accessibility to trains and platforms, improve environmental performance, and renew paving and canopies, in coherence with the overall identity of the station.

For the Palazzine Area (Area C – 8,170 m^2), the guidelines suggest improving usability and connections with the passenger building, as well as a comprehensive refurbishment of the office buildings (Palazzina Movimento and Palazzina Ingegneria) and their external spaces to enhance urban and environmental quality. For the Parking area (Area D – 20,810 m^2), sustainability-related issues indicate the need to improve pedestrian accessibility, enhance environmental quality, mitigate microclimatic and acoustic conditions, and reorganise surfaces currently used for surface parking.

Beyond interventions in individual sub-areas, the need emerged to strengthen the systemic relationship between the station and the city, particularly by enhancing cycling mobility, multimodal interchange, and the quality of surrounding public spaces (Area E). These actions would extend regeneration beyond the railway boundary, configuring Cadorna as an integrated urban infrastructure capable of contributing to widespread accessibility and public space quality from a territorial equity perspective.

As a complement to the analysis, some possible spatial interpretations of the identified guidelines were developed. These do not constitute validation of the method itself but represent a possible design vision of the proposed strategies, applied to specific elements of the station area (Figg. 13, 14).

Discussion: synergies, trade-offs, transferability | The contribution highlights how the regeneration of railway station areas requires structured synergies between infrastructure asset owners, public administrations, local authorities, private investors, and local communities. The hybrid nature of the station – both a technical node and a public space – implies the need to reconcile different and not always convergent demands, including asset valorisation, infrastructural upgrading, economic sustainability, and proximity-based functions.

The application of the multi-criteria method has shown that these synergies inevitably generate trade-offs: increasing multimodality entails complex spatial reconfigurations; introducing new proximity functions may conflict with real estate valorisation models; and preserving historical heritage may limit interventions aimed at energy efficiency or volumetric expansion. The macro-area-based approach makes these dynamics explicit and supports informed programmatic decisions at the network scale, integrating infrastructural innovation with attention to territorial cohesion. This perspective aligns with urban strategic foresight approaches that, at the European scale, emphasise the construction of shared visions and long-term scenarios for infrastructure and territories (Mantziaras, 2024). The limitations of the study are related to the varying levels of operational maturity among the analysed stations: while some nodes already have active programmes, many stations are still at the stage of strategic vision, making the method verifiable primarily in terms of programmatic orientation rather than through ex post monitoring of outcomes. At present, the method has been applied only to the Cadorna case, but validation is ongoing for stations in the Milan hinterland along the Milano-Saronno line. Further critical issues concern the availability and homogeneity of data, which are

not always guaranteed in less structured contexts, as well as the choice to prioritise a qualitative multi-criteria evaluation, which enhances applicability and adaptability but does not allow for standardised quantitative measurement of impacts.

The dissemination of a systemic approach to station regeneration also encounters cultural, economic, and institutional barriers. A perception of the station as a purely technical infrastructure persists, while fragmented ownership and rigid concession models may hinder integrated interventions. Regulatory complexity and heritage constraints require stable and coordinated forms of multi-level governance. Within this context, the proposed method can be understood as an adaptable tool for regional railway networks characterised by distributed assets and similar concession structures, thanks to its modular articulation – mapping, checklist, targeted analyses, and participation – which ensures comparability at the network scale and flexibility across different contexts.

In relation to the Sustainable Development Goals, the proposed methodological approach directly contributes to strengthening resilient infrastructure (SDG 9), reducing territorial inequalities (SDG 10), enhancing urban quality and sustainable regeneration (SDG 11), and mitigating environmental impacts (SDG 13). These contributions are accompanied by indirect effects on other areas, particularly urban well-being (SDG 3), equitable access to services and opportunities (SDG 1), the quality of public spaces and living environments (SDG 16), and the strengthening of cooperation between public and private actors (SDG 17), generating synergies between mobility, public space, and social inclusion. At the same time, the methodological approach highlights potential trade-offs among economic efficiency, heritage protection, and environmental objectives, and their management requires appropriate levels of governance, data availability, and coordination among stakeholders.

Conclusions | The research contributes to the debate on the regeneration of railway stations by proposing their interpretation as territorial infrastructures of proximity, capable of integrating the infrastructural dimension, spatial quality, services, and social inclusion at the network scale. In particular, the contribution introduces a multi-criteria method that translates into operational terms the main dimensions emerging from recent literature on the regeneration of station areas – intermodality, proximity, sustainability, and governance – overcoming sectoral approaches and proposing a comparative structure applicable to heterogeneous contexts.

In a European and Italian context characterised by the widespread presence of stations requiring infrastructural, functional, and environmental upgrading, the presented methodological approach enables a transition from a descriptive reading of critical issues to their prioritisation and operationalisation, supporting more informed decision-making in the programming of interventions. In this sense, the contribution is configured not only as an analytical tool, but also as a support device for strategic planning, capable of connecting infrastructural and urban dimensions.

From the perspective of transferability, the method can be applied to railway networks characterised by distributed assets and different governance conditions, thanks to its modular and adaptable structure. Its application, however, requires certain basic conditions, such as the availability of minimum data, the presence of classification systems, and collaboration among infrastructure managers, local administrations, and territorial actors.

From a research agenda perspective, the study opens up further developments, particularly in the integration of qualitative and quantitative indicators in the analysis and evaluation of existing assets; in the exploration of multi-level governance models for managing urban and railway regeneration processes; in the definition of ex post monitoring systems for social and environmental impacts; and in the further development of methods and processes for the adaptive reuse and transformation of railway spaces and heritage. Within this perspective, railway stations can be understood as central devices for the ecological and social transition of contemporary cities, contributing to guiding policies towards more equitable mobility systems, more inclusive public spaces, and greater territorial cohesion.

Acknowledgements

The paper refers to two completed research projects: 1) Supporto alle attività edilizie', a research contract between Ferrovie Nord S.p.A. and the Department of Architecture, Built Environment and Construction Engineering, signed on 18/07/2024 pursuant to Article 2.4 of the Framework Agreement for Scientific Collaboration signed on 02/02/2021 no. 4600008166 and renewed on 30/01/2024. (Scientific Coordinator Prof. M. P. Vettori; Research Group: S. Battaglia, F. Daprà, A. Dechamps); 2) 'Programma strategico per intervento di rigenerazione della stazione di Cadorna', a research contract between Ferrovie Nord S.p.A. and the Department of Architecture, Built Environment and Construction Engineering, signed on 19/06/2025 pursuant to Article 2.4 of the Framework Agreement for Scientific Collaboration signed on 02/02/2021 no. 4600008166 and renewed on 30/01/2024 (Scientific Coordinator Prof. M. P. Vettori; Research Group: S. Battaglia, F. Daprà, A. Dechamps, C. Giussani, and M. Mastromarino).

The paper is the result of a shared reflection by the Authors. Nevertheless, the introductory section is attributed to M. P. Vettori; 'Comparative international experiences in station regeneration' to A. Dechamps; 'The Lombardy station system as a territorial infrastructure' and 'A systemic method for station regeneration as proximity infrastructures' to F. Daprà; 'Milano Cadorna: a case application' to S. Battaglia; and the concluding section to all the Authors.

Notes

1) The document 'Het Stationsconcept' contains the overall guidelines concerning the role and conception of stations. There are also numerous documents addressing specific themes that function as policy manuals for station regeneration or design, covering topics ranging from lighting to circularity, from landscape impacts to the regeneration of areas surrounding stations. For more information, see: spoorbeeld.nl/beleid [Accessed 2 April 2026].

2) Out of a total sample of 348 stations in the Lombardy network (excluding provincial capitals, already regenerated stations, and inactive ones), in 2023, 197 stations were unattended, corresponding to 56% of the total, of which 115 were managed by Rete Ferroviaria Italiana and 82 by Ferrovie Nord (SINLOC, 2023).

3) Ferrovie Nord is part of the Ferrovie Nord Milano Group, through which the Lombardy Region directly intervenes in the management and upgrading of infrastructure, and through Trenord (another company of the FNM Group), coordinates – together with Trenitalia – the regional railway service operating on a large-scale system covering almost all municipalities in Lombardy.

4) The classification of stations by typology was developed in a previous research project, which distinguished between historical stations and modern stations, as well as additional categories based on the specific characteristics of passenger buildings. This classification, currently in use, is defined in the Station Interior Spaces Manual ('Definizione delle linee guida per le scelte stilistiche, dei materiali e finiture degli spazi del gruppo FNM e per la specializzazione dei criteri utili alla definizione dei requisiti quali-quantitativi degli spazi ufficio', research contract under Article 2.4 of the Framework Agreement for Scientific Collaboration signed on 02/02/2021 no. 4600008166 between Ferrovie Nord S.p.A. and Politecnico di Milano; Scientific Coordinator: M. P. Vettori).

5) The station ranking system, established in an official Ferrovie Nord document, classifies stations based on five weighted parameters: passenger flow, stopping trains, typology, services, and relevance. The categories are defined as follows: platinum (9 stations), gold (19 stations), silver (22 stations), bronze (41 stations), and white (24 stations). The complete classification is outlined in the document 'Station Ranking for the Milano and Iseo Network' (internal Ferrovie Nord document, 2022).

6) The panel of indicators was constructed, according to the five macro-areas, based on national and international documents, consulted literature, and previous research conducted by the authors on multi-criteria tools for analysing built heritage; some indicators were directly provided by infrastructure managers. In particular, for mobility and passenger services, indicators from international documents such as UIC (2020, 2023) and ARUP (2019, 2022) were considered. For building quality, station functionality, and sustainability, refer to SINLOC (2023) and Trenord (2024).

7) The evaluation is based on the percentage of indicators satisfied relative to the total number of indicators for each criterion. Specifically, the evaluation level is defined as 'high' when more than 67% of indicators are satisfied, 'medium' when from 36% to 63% are satisfied, and 'low' when fewer than 33% or below are satisfied.

8) The first phase of governance-level participation has been completed, and some questions have been included in Trenord's customer satisfaction survey; the extended questionnaire for users is currently under validation and will be administered in the coming months.

References

ARUP (2022), *Active Train Stations*. [Online] Available at: arup.com/insights/active-train-stations/ [Accessed 2 April 2026].

ARUP (2020), *Future of Stations*. [Online] Available at: arup.com/globalassets/downloads/insights/future-of-stations.pdf [Accessed 2 April 2026].

ARUP (2019), *Tomorrow's Living Station*. [Online] Available at: arup.com/insights/tomorrows-living-station/ [Accessed 2 April 2026].

Banerjee, I. and Saha, A. (2022), "Mobility centre-oriented urban regeneration – Examining place value of railway stations", in *GeoJournal*, vol. 87, issue supp. 4, pp. 567-581. [Online] Available at: doi.org/10.1007/s10708-022-10582-y [Accessed 2 April 2026].

Berretta, T., Desideri, F. and Staltari, M. (2024), "Il progetto dello spazio pubblico, tra complessità e crisi ecologica – Da sfida a opportunità per la rigenerazione urbana | Public space project, between complexity and ecological crisis – From challenge to opportunity for urban regeneration", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 16, pp. 74-87. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/1662024 [Accessed 2 April 2026].

Bertolini, L. (1999), "Spatial development patterns and public transport – The application of an analytical model in The Netherlands", in *Planning Practice and Research*, vol. 14, issue 2, pp. 199-210. [Online] Available at: doi.org/10.1080/02697459915724 [Accessed 2 April 2026].

Bertolini, L. (1996), "Nodes and places – Complexities of railway station redevelopment", in *European Planning Studies*, vol. 4, issue 3, pp. 331-345. [Online] Available at: doi.org/10.1080/09654319608720349 [Accessed 2 April 2026].

Bertolini, L. and Spit, T. (1998), *Cities on Rails – The Redevelopment of Railway Station Areas*, Routledge, London. [Online] Available at: doi.org/10.4324/9780203980439 [Accessed 2 April 2026].

Bertolini, L., le Clercq, F. and Kapoen, L. (2005), "Sustainable accessibility – A conceptual framework to integrate transport and land use plan-making – Two test-applications in the Netherlands and a reflection on the way forward", in *Transport Policy*, vol. 12, issue 3, pp. 207-220. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.tranpol.2005.01.006 [Accessed 2 April 2026].

Bruinsma, F. (2009), "The Impact of Railway Station Development on Urban Dynamics – A Review of the Amsterdam South Axis Project", in *Built Environment*, vol. 35, issue 1, pp. 107-121. [Online] Available at: jstor.org/stable/23289647 [Accessed 2 April 2026].

Bruno, D., Palmieri, S., Palomba, R., D'Alessandro, F. and Bisson, M. (2024), "Infrastrutture di mobilità intelligenti e sostenibili – Un nuovo sistema di connessioni urbane | Smart and sustainable mobility infrastructure – A new system of urban connections", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 15, pp. 286-295. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/1522024 [Accessed 2 April 2026].

Bureau Spoorbouwmeester (2025), *Het Stationsconcept – Visie, kaders en toepassing – Versie 3.0, 2025*. [Online] Available at: spoorbeeld.nl/beleid/station/het-stationsconcept [Accessed 2 April 2026].

Campagnaro, C., Ronsivalle, D., Di Prima, N., Curtabbi, G. and Passaro, R. (2025), "Fare e rifare – Opportunità e limiti della co-progettazione per gli spazi pubblici e di welfare | Doing and redoing – Opportunities and limits of co-design for public and welfare spaces", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 17, pp. 310-323. [Online] Available at: doi.org/10.69143/2464-9309/17212025 [Accessed 2 April 2026].

Canessa, N. V. and Centanaro, C. (2024), "Co(mplex)city – Utente come sensore urbano e mobilità accessibile nel progetto Mobiquity | Co(mplex)city – User as urban sensor and accessible mobility in the Mobiquity project", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 16, pp. 88-97. [Online] Available at: doi. org/10.19229/2464-9309/1672024 [Accessed 2 April 2026].

Cangelli, E. (2025), "Rigenerazione urbana e SDG – Approcci progettuali per la riduzione delle disuguaglianze urbane | Urban regeneration and SDGs – Design approaches for reducing urban inequalities", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 17, pp. 28-41. [Online] Available at: doi.org/10.69143/2464-9309/1712025 [Accessed 2 April 2026].

Cervero, R. (1998), *The transit metropolis – A global inquiry*, Island Press, Washington.

Conticelli, E. (2011), "Assessing the potential of railway station redevelopment in urban regeneration policies – An Italian case study", in *Procedia Engineering*, vol. 21, pp. 1096-1103. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.proeng.2011.11.2116 [Accessed 22 March 2026].

Cornolò, G. (2006), *Ferrovie Nord Milano in tre secoli*, Maggioni, Milano.

European Commission (2011), *White Paper – Roadmap to a Single European Transport Area – Towards a Competitive and Resource Efficient Transport System*, document 52011DC0144, COM(2011) 144 final. [Online] Available at: eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex:52011DC0144 [Accessed 12 April 2026].

Fabbri, I. (2023), "Smart Hubs – Una rete di oggetti urbani multifunzionali a supporto della micromobilità a Ferrara | Smart Hubs – A network of multifunctional urban objects to support micromobility in Ferrara", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 14, pp. 304-315. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/14262023 [Accessed 12 April 2026].

Fiorini, L., Saganeiti, L., Perazzini, M., Bontempo, D., Bucci, M., Giancola, M. and Perilli, E. (2025), "L'impatto dei modelli urbani sul supporto sociale – Tra giustizia spaziale e sviluppo sostenibile | The impact of urban models on social support – Between spatial justice and sustainable development", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 17, pp. 196-207. [Online] Available at: doi.org/10.69143/2464-9309/17132025 [Accessed 2 April 2026].

FNM – Ferrovie Nord Milano (2024a), *FNM Group Strategic Plan 2024-2029.* [Online] Available at: fnmgroup.it/wp-content/uploads/2024/11/Piano-Strategico-Gruppo-FNM-2024-2029_errata-corrige.pdf [Accessed 2 April 2026].

FNM – Ferrovie Nord Milano (2024b), *Progetto FILI*. [Online] Available at: fnmgroup.it/wp-content/uploads/2024/11/Progetto-Fili-1.pdf [Accessed 2 April 2026].

Griffin, G. P. and Sener, I. N. (2016), "Planning for bike share connectivity to rail transit", in *Journal of Public Transportation*, vol. 19, issue 2, pp. 1-22. [Online] Available at: doi.org/10.5038/2375-0901.19.2.1 [Accessed 2 April 2026].

ITF – International Transport Forum (2015), *Urban Mobility System Upgrade – How shared self-driving cars could change city traffic.* [Online] Available at: itf-oecd.org/sites/default/files/docs/15cpb_self-drivingcars.pdf [Accessed 2 April 2026].

Mantziaras, P. (2024), "La previsione strategica urbana nel contesto europeo – Le lezioni di Ginevra e Lussemburgo | Urban strategic foresight in European territories – Lessons from Geneva and Luxembourg", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 15, pp. 30-47. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/1522024 [Accessed 2 April 2026].

Meeks, C. L. V. (1995), *The railway station – An architectural history*, Dover Publications, New York.

Nederlandse Spoorwegen (2025), *Vervoerplan NS 2025*. [Online] Available at: ns.nl/binaries/_ht_1735549343739/content/assets/ns-nl/over-ons/vervoerplan-ns-2025.pdf [Accessed 2 April 2026].

Nederlandse Spoorwegen (2024), *NS Annual Report 2024*. [Online] Available at: nsannualreport.nl/external/asset/download/project/f9822a0a-03ee-0000-1d58-bb5f7bb302a1/name/NS_annualreport_2024.pdf [Accessed 2 April 2026].

Otsuka, N. and Reeve, A. (2024), "Railway stations as public space – How to promote rail journeys via multi-functional railway stations", in *European Planning Studies*, vol. 32, issue 5, pp. 973-1009. [Online] Available at: doi.org/10.1080/09654313.2023.2246508 [Accessed 2 April 2026].

Paone, S. (2023), "The Renovation of Italian Railway Stations – From the Journey to the Consumption of the Journey", in *Academic Journal of Interdisciplinary Studies*, vol. 12, issue 1, pp. 24-33. [Online] Available at: doi.org/10.36941/ajis-2023-0003 [Accessed 2 April 2026].

Peek, G.-J., Bertolini, L. and De Jonge, H. (2006), "Gaining insight in the development potential of station areas – A decade of node-place modelling in The Netherlands", in *Planning Practice and Research*, vol. 21, issue 4, pp. 443-462. [Online] Available at: doi.org/10.1080/02697450701296247 [Accessed 2 April 2026].

Peters, D. and Novy, J. (2012), "Train Station Area Development Mega-Projects in Europe – Towards a Typology", in *Built Environment*, vol. 38, issue 1, pp. 12-30. [Online] Available at: jstor.org/stable/23289698 [Accessed 2 April 2026].

RFI – Rete Ferroviaria Italiana (2022), *Stazioni Impresenziate – Un riuso sociale del patrimonio ferroviario.* [Online] Available at: rfi.it/content/dam/rfi/stazioni/spazi-in-stazione/RFI_Stazioni_impresenziate.pdf [Accessed 2 April 2026].

RFI –Rete Ferroviaria Italiana (2015), *Stazioni ferroviarie – Come rigenerare un patrimonio*. [Online] Available at: rfi.it/content/dam/rfi/stazioni/spazi-in-stazione/stazioni-ad-uso-sociale/Stazioni_Ferroviarie_come_riqualificare_un_patrimonio_RFI_2015.pdf [Accessed 2 April 2026].

Ricci, L., Poli, I. and Marino, M. (2025), "Welfare urbano e rigenerazione – Sostenibilità e inclusione sociale per il raggiungimento degli SDG | Urban welfare and regeneration – Sustainability and social inclusion for achieving the SDGs", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 17, pp. 94-107. [Online] Available at: doi.org/10.69143/2464-9309/1752025 [Accessed 2 April 2026].

Setola, N. and Borgianni, S. (2025), "Promuovere salute e benessere – Strumenti per il progetto di Case della Comunità e quartieri sani | Promoting health and well-being – Tools for designing community health centres and healthy neighbourhoods", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 17, pp. 226-241. [Online] Available at: doi.org/10.69143/2464-9309/17152025 [Accessed 2 April 2026].

SINLOC (2023), *Sviluppo e valorizzazione del sistema delle stazioni ferroviarie impresidiate di Regione Lombardia*. [Online] Available at: sinloc.com/progetti/sviluppo-e-valorizzazione-del-sistema-delle-stazioni-ferroviarie-impresidiate-di-regione-lombardia/ [Accessed 2 April 2026].

Trenord (2024), *Bilancio di Sostenibilità 2024*. [Online] Available at: trenord.it/fileadmin/contenuti/TRENORD/Pagine_di_servizio/Chi_siamo/Bilancio_di_sostenibilita/bilancio_di_sostenibilita_2024.pdf [Accessed 2 April 2026].

UIC (2023), *A classification and categorization system for tourist-friendly Railway services and experiences.* [Online] Available at: toprail.org/wp-content/uploads/2026/04/2023_TopRail_Report_v13_complet-1_compressed.pdf [Accessed 2 April 2026].

UIC (2020), *Guidelines on how to increase attractiveness for rail tourism*. [Online] Available at: toprail.org/wp-content/uploads/2023/06/20200331_guidelines_on_how_to_increase_attractiveness_for_rail_tourism-1.pdf [Accessed 2 April 2026].

UIC (2017), *Railway Handbook – Energy Consumption and CO_2 Emissions – Focus on passenger rail services*. [Online] Available at: uic.org/IMG/pdf/handbook_iea-uic_2017_web3.pdf [Accessed 2 April 2026].

Zandonai, F. (2015), *Il riuso di strutture ferroviarie a scopo sociale – Casi studio e indicazioni per la gestione*. [Online] Available at: euricse.eu/it/publications/il-riuso-di-strutture-ferroviarie-a-scopo-sociale-casi-studio-e-indicazioni-per-la-gestione/ [Accessed 2 April 2026].

ARCHITECTURE
Research & Experimentation

AGATHÓN – International Journal of Architecture, Art and Design | n. 19 | 2026 | pp. 172-191
ISSN print: 2464-9309 – ISSN online: 2532-683X | doi.org/10.69143/2464-9309/19102026

Article Info

Received 10 March 2026
Revised 15 April 2026
Accepted 17 April 2026
Published 30 June 2026

RIFUGI CLIMATICI COME INFRASTRUTTURE URBANE ADATTIVE

Una rete sistemica per ridurre le disuguaglianze

CLIMATE SHELTERS AS ADAPTIVE URBAN INFRASTRUCTURES

A systemic network to reduce inequalities

Danila Longo, Rossella Roversi, Riccardo Mercuri, Beatrice Turillazzi

Abstract

Il cambiamento climatico sta intensificando le disuguaglianze nelle aree urbane, colpendo in modo più grave le popolazioni vulnerabili durante le ondate di caldo estremo. In tale contesto il presente articolo propone una reinterpretazione critica dei rifugi climatici come infrastrutture urbane permanenti di ridistribuzione esplicitamente collegate all'SDG 10 (Ridurre le disuguaglianze). Attraverso una revisione critica della letteratura svolta in maniera strutturata, un'analisi comparativa di casi studio internazionali pionieristici (Barcellona, Parigi, Bilbao) e la sperimentazione condotta a Bologna nell'ambito dei progetti PNRR Ecosister e TALEA, la ricerca dimostra come reti interconnesse di rifugi climatici, concepiti come dispositivi relazionali e sistemici che integrano soluzioni basate sulla natura, innovazione digitale e inclusione sociale possano contrastare le ingiustizie spaziali e climatiche, garantendo il diritto al comfort come diritto ambientale condiviso.

Climate change is intensifying inequalities in urban areas, affecting vulnerable populations more severely during extreme heatwaves. In this context, this article proposes a critical reinterpretation of climate shelters as permanent urban infrastructures of redistribution explicitly linked to SDG 10 (Reduce inequalities). Through a structured critical literature review, a comparative analysis of pioneering international case studies (Barcelona, Paris, Bilbao), and the experimentation conducted in Bologna within the PNRR Ecosister and TALEA projects, the research demonstrates how interconnected networks of climate shelters, conceived as relational and systemic devices integrating nature-based solutions, digital innovation, and social inclusion, can counter spatial and climate injustices, guaranteeing the right to comfort as a shared environmental right.

Keywords

rifugi climatici, giustizia climatica, infrastrutture verdi, vulnerabilità climatica urbana, equità spaziale

climate shelters, climate justice, green infrastructures, urban climate vulnerability, spatial equity

Danila Longo, Architect and PhD, is a Full Professor of Architectural Technology at the Department of Architecture of the University of Bologna (Italy) and UniBO Representative in the 'European Construction, built environment and energy efficient building Technology Platform' (ECTP). She works on energy efficiency, climate adaptation, and co-design for the green transition. E-mail: danila.longo@unibo.it

Rossella Roversi, Architect and PhD, is a Researcher at the Department of Architecture of the University of Bologna (Italy). She works on urban regeneration, climate-change adaptation strategies, energy transition, urban-scale digital twins, and enhancement of Cultural Heritage. E-mail: rossella.roversi@unibo.it

Riccardo Mercuri, PhD Candidate at the Department of Architecture of the University of Bologna (Italy), works on Transition Design with a planet-oriented approach in contexts of climate fragility. E-mail: riccardo.mercuri2@unibo.it

Beatrice Turillazzi, Architect and PhD, is Associate Professor of Architectural Technology at the Department of Architecture of the University of Bologna (Italy). She works on building design, accessibility, BIM, and the digitalisation of the built environment. E-mail: beatrice.turillazzi@unibo.it



Il cambiamento climatico aggrava le disuguaglianze nelle aree urbane esponendo in modo sproporzionato le popolazioni più vulnerabili a temperature estreme e a eventi meteorologici intensi (IPCC, 2023; Nazish, Abbas and Sattar, 2024). In contesti segnati da asimmetrie socioeconomiche e culturali, in cui le vulnerabilità si sovrappongono secondo logiche intersezionali, lo spazio pubblico può fungere da infrastruttura adattiva, capace di contrastare tali ingiustizie e di offrire risorse climatiche accessibili e non discriminatorie. Il diritto alla protezione climatica e al comfort termico si intreccia così con le questioni di giustizia spaziale (Mitchell, 2003) ed energetica, evidenziando come la distribuzione delle opportunità socioambientali sia fortemente influenzata dai modelli insediativi (Fiorini et alii, 2025). Tale dinamica è particolarmente acuta per le popolazioni anziane: la letteratura recente documenta come l'esposizione al caldo estremo si combini con la mobilità ridotta e l'isolamento sociale, rendendo questa fascia demografica la più esposta al rischio termico e la meno in grado di accedere autonomamente a spazi di protezione (Chaza Chimeno, Revellini and Cellucci, 2024). Il rifugio climatico accessibile risponde dunque a una fragilità situata e non generica, con una forte rilevanza per gli SDG 3 e 10.

In questo quadro il concetto di 'rifugio climatico' si è evoluto da spazio emergenziale a infrastruttura permanente di benessere urbano, capace di redistribuire benefici ambientali e ridurre forme di marginalizzazione climatica (Amorim-Maia et alii, 2023). Questa evoluzione si inserisce coerentemente nel dibattito sugli spazi intermedi come dispositivi climatici in grado di modulare dinamiche termiche e sociali nella città contemporanea (Tucci, Altamura and Pani, 2023). A tal proposito il presente contributo propone una ridefinizione del rifugio climatico attraverso una prospettiva sistemica e relazionale, interpretandolo come dispositivo di giustizia spaziale e strumento operativo per la riduzione delle disuguaglianze, in linea con l'SDG 10.

Alla luce di queste premesse il contributo ricostruisce criticamente l'evoluzione del rifugio climatico attraverso la letteratura e alcuni casi studio internazionali, definendo un quadro teorico coerente con le attuali sfide di giustizia climatica e spaziale. Tale quadro dialoga con le sperimentazioni condotte a Bologna nell'ambito del progetto PNRR Ecosister – Ecosistema Territoriale di Innovazione dell'Emilia-Romagna (ECS_00000033) e del progetto europeo TALEA – Green Cells Leading the Green Transition (EUI02-064). Quest'ultimo ha tradotto il concetto di rifugio climatico in una serie di dispositivi operativi e scalabili, denominati Green Cells, microecosistemi urbani modulari che rappresentano una nuova forma di rifugio climatico, combinando Nature-based Solutions (NbS), innovazione sociale e tecnologica per produrre effetti diffusi di mitigazione termica e di rigenerazione urbana (Roversi and Longo, 2025).

Il contributo intende in tal modo evidenziare il potenziale del rifugio climatico come infrastruttura urbana redistributiva, capace di integrare NbS, innovazione sociale e strumenti digitali, offrendo spunti rilevanti per la comunità scientifica nell'ambito della transizione ecologica, della progettazione urbana e del dibattito sulla giustizia spaziale. In questa prospettiva il rifugio climatico non è solo un presidio funzionale di protezione termica, ma una componente di un'infrastruttura urbana più ampia, adattiva e redistributiva, radicata nella trasformazione dello spazio pubblico come risposta progettuale alla crisi ecologica (Berretta, Desideri and Staltari, 2024).

Il contributo si articola in tre sezioni: la prima ricostruisce il quadro teorico dalla letteratura; la seconda presenta la valutazione comparativa di 50 casi studio internazionali; la terza illustra la sperimentazione bolognese. L'originalità del contributo risiede nel proporre il rifugio climatico come infrastruttura redistributiva permanente, superando la letteratura esistente che lo tratta prevalentemente come dispositivo emergenziale e nella sua trasposizione operativa attraverso il concetto di Green Cell. Questo approccio mira a offrire alla comunità scientifica un framework replicabile per integrare giustizia climatica e progettazione urbana.

Metodologia | La ricerca adotta un approccio integrato, articolato in tre fasi complementari coerenti con il framework metodologico del progetto TALEA che struttura l'innovazione urbana in tre dimensioni: fisica, sociale e digitale.

Fase 1 – Revisione critica della letteratura, svolta in modo strutturato, e quadro teorico. La prima fase consiste in una revisione della letteratura scientifica internazionale sul tema dei rifugi climatici, finalizzata a ricostruirne l'evoluzione del concetto da spazio emergenziale a infrastruttura permanente di benessere urbano e a definire il quadro teorico che collega rifugio climatico, giustizia spaziale e riduzione delle disuguaglianze.

La revisione ha adottato un approccio critico e strutturato, finalizzato a garantire la trasparenza e la tracciabilità del processo di raccolta e selezione delle fonti. Sono stati consultati i database Scopus e Google Scholar, integrati con documenti istituzionali (OMS, IPCC, EEA) e con report tecnici pertinenti ai temi della giustizia climatica, del caldo estremo, delle NbS e dello spazio pubblico adattivo. L'arco temporale considerato è compreso tra il 2003 – anno dell'ondata di calore europea che rappresenta il punto di svolta nelle politiche di adattamento – e il 2025.

I criteri di inclusione hanno riguardato la pertinenza tematica rispetto alla giustizia climatica, alla vulnerabilità urbana, alle NbS e allo spazio pubblico adattivo, la disponibilità in lingua inglese e italiana, il riferimento a contesti urbani e la natura peer-reviewed dei contributi scientifici. Sono stati esclusi gli studi relativi a contesti rurali o incentrati su rischi climatici diversi dal caldo estremo. La selezione finale è avvenuta attraverso una lettura progressiva del titolo, dell'abstract e del testo completo, privilegiando i contributi con un forte ancoraggio empirico o teorico ai temi della ricerca.

L'approfondimento dei contenuti della revisione è stato ulteriormente articolato nel contesto del progetto Ecosister attraverso una lettura multilivello e integrata dello spazio urbano, applicata a specifiche zone della Città di Bologna, basata sull'analisi dell'evoluzione storica del paesaggio e delle sue variazioni microclimatiche. Tale approccio ha consentito di restituire maggiore profondità progettuale al concetto di rifugio climatico, rafforzandone il legame con i temi della giustizia spaziale e delle disuguaglianze. Sono stati privilegiati i documenti ufficiali di organismi internazionali, con particolare attenzione alla letteratura europea e mediterranea sulla giustizia climatica, sulle NbS, sulla 'violenza lenta' e sull'adattamento urbano.

Fase 2 – Analisi comparativa delle prestazioni dei casi studio. La seconda fase prevede un'analisi comparativa di casi studio internazionali selezionati attraverso una matrice di valutazione comparativa delle prestazioni strutturata, sviluppata nel progetto TALEA. La matrice valuta 50 progetti di rigenerazione urbana basati sulle NbS secondo i criteri di scala di intervento, tipo di Green Cell (nodale, lineare, diffusa), configurazione spaziale, NbS adottate, dimensione di innovazione fisica, sociale e digitale, barriere e fattori abilitanti, replicabilità e potenziale come rifugio climatico. Questa fase consente di identificare strategie ricorrenti e lezioni apprese trasferibili al contesto bolognese.

I casi studio sono stati selezionati in base a quattro criteri espliciti, definiti nel deliverable D5.1.1 del progetto TALEA. Il primo criterio è il riconoscimento come buona pratica internazionale: sono stati inclusi progetti premiati o citati nella letteratura scientifica per il loro contributo innovativo alla rigenerazione urbana basata sulle NbS, con particolare attenzione a quelli che integrano più tipologie di soluzioni per massimizzare i co-benefici ambientali e sociali e che dimostrano compatibilità con contesti sensibili (centri storici, aree consolidate). Il secondo criterio riguarda la copertura delle scale urbane del progetto TALEA: dalla scala dell'isolato e del quartiere (superblocks, interventi di blocco) fino alla scala urbana e metropolitana (reti verdi, piani di forestazione), includendo anche interventi puntuali di qualità sperimentale.

Il terzo criterio è la combinazione di più dimensioni di innovazione: non solo interventi fisici di elevata qualità, ma anche componenti sociali integrate (processi partecipativi, usi socialmente innovativi) e/o strumenti digitali (tecnologie smart per il monitoraggio e la gestione), poiché l'attivazione coordinata di più leve è condizione fondamentale per abilitare la transizione ecologica a scala urbana. Il quarto criterio è l'integrazione di più NbS complementari: sono stati privilegiati i progetti che combinano elementi diversi (alberi, elementi idrici, superfici permeabili, verde verticale) rispetto a quelli basati su un'unica soluzione. La selezione ha incluso progetti provenienti da contesti climatici eterogenei (Europa centrale, area mediterranea, America Latina) e da tessuti urbani differenziati (centri storici, periferie, aree di riuso), garantendo la rappresentatività geografica e morfologica necessaria a estrarre lezioni trasferibili al contesto bolognese.

Fase 3 – Sperimentazione a Bologna: indicatori e localizzazione strategica. La terza fase si concentra sulle sperimentazioni condotte a Bologna, dove la convergenza tra le ricerche confluite nel progetto TALEA, in particolare quella del partner di consorzio Fondazione Bruno Kessler[1] ha permesso di sviluppare mappature multilivello di vulnerabilità sociale e fragilità climatica basate su tre indicatori compositi: il General Fragility Index (GFI), che integra variabili demografiche, sociali ed economiche; il Climate Fragility Index (CFI), calcolato attraverso la regola 3-30-300[2] (Konijnendijk, 2023); e il Climate Shelter Index (CSI), che valuta la capacità delle aree verdi urbane di funzionare come rifugi climatici sulla base di caratteristiche biofisiche e di accessibilità sociale (Maccabiani et alii, 2025).

L'integrazione dei tre indicatori nel General and Climate Fragility Index (GCFI) consente di leggere simultaneamente vulnerabilità e capacità adattiva, orientando, in sinergia con le altre tecnologie TALEA, la localizzazione strategica delle Green Cells

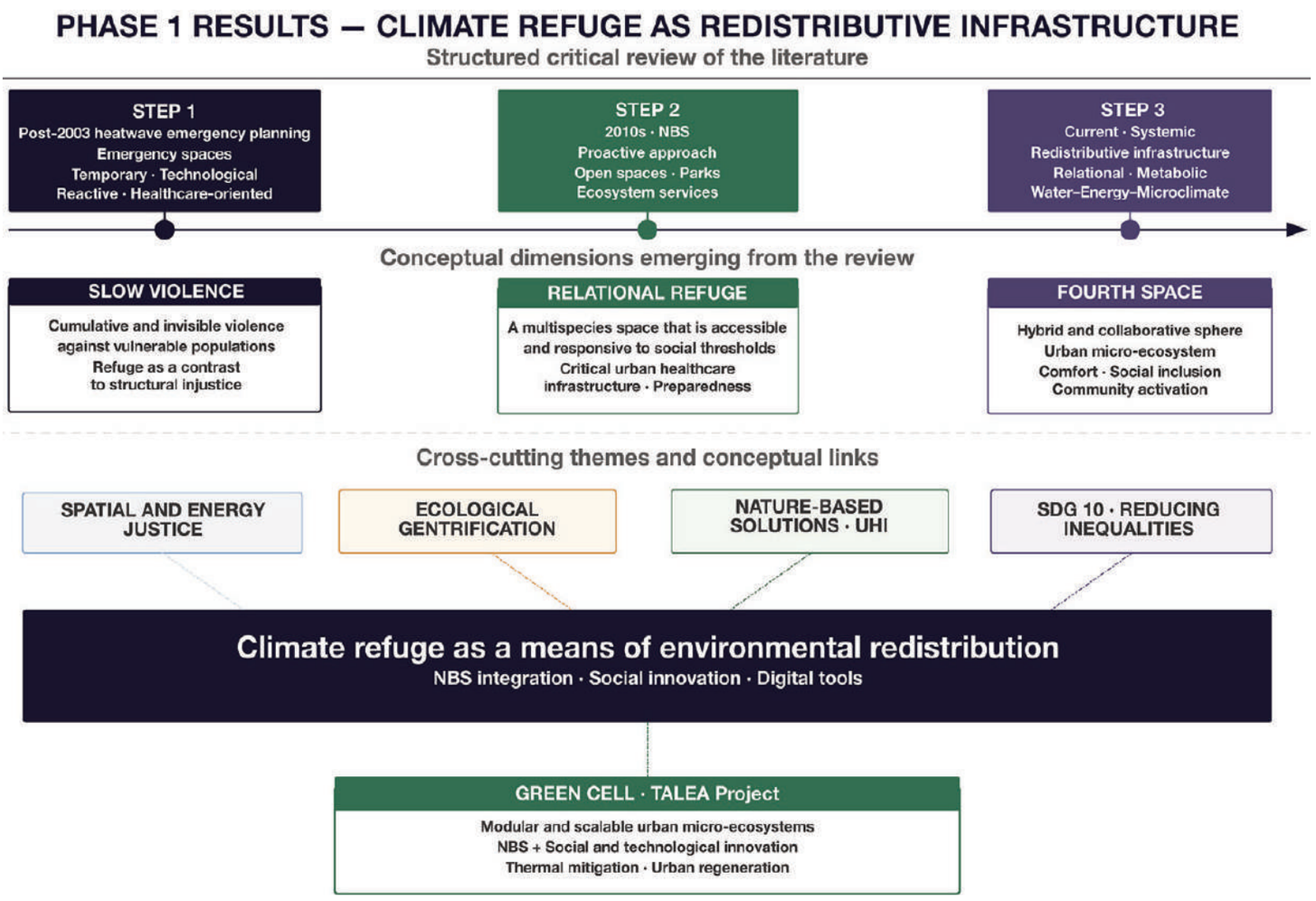


Fig. 1 | Summary diagram of the results of Phase 1 of the methodology (credit: the Authors, 2026).

come nuova forma di rifugio climatico. Tale integrazione si allinea alle interpretazioni più aggiornate delle infrastrutture verdi e blu come sistemi complessi di gestione integrata delle risorse naturali nei contesti urbani (Valente et alii, 2024).

Il GFI e il GCFI operano nell'unità territoriale delle aree statistiche del Comune di Bologna. Per ciascuna area e per ciascuna delle tre componenti tematiche (demografica, sociale ed economica) la distribuzione dei valori sull'intero territorio è suddivisa in quintili, che corrispondono a cinque classi categoriche (fragilità bassa, medio-bassa, media, medio-alta, alta) codificate numericamente da 1 a 5. Questa quintilizzazione costituisce la fase di normalizzazione che rende le tre componenti comparabili su una scala comune indipendentemente dalla natura e dall'unità di misura delle variabili originali.

Le tre componenti vengono poi aggregate con pesi diversi: il peso maggiore attribuito alla componente sociale riflette una scelta metodologica esplicita, coerente con la letteratura sulla fragilità urbana e con l'orientamento dell'SDG 10. Il CFI è calcolato per la stessa unità territoriale (aree statistiche) secondo la regola 3-30-300, utilizzando dati Sentinel-2 (Google Earth Engine), DBSN e OpenStreetMap. Il CSI opera su una diversa unità territoriale: le singole aree verdi pubbliche accessibili, con superficie superiore a 0,5 ha e NDVI > 0,4. Nella Tabella 1 sono sintetizzati, per ciascun indicatore, l'unità territoriale di calcolo, le componenti / variabili incluse, la procedura di normalizzazione, le ponderazioni adottate e la formula di aggregazione, rendendo la metodologia pienamente replicabile in altri contesti urbani. Per una trattazione più approfondita sulla metodologia si rimanda al testo di Maccabiani et alii (2025). L'approccio metodologico adottato risulta coerente con gli sviluppi più recenti degli strumenti di modellazione e simulazione a supporto delle decisioni nel campo della mitigazione climatica (Zarcone, Nava and Tucci, 2024).

Risultati e discussione della Fase 1 – Il rifugio climatico come infrastruttura redistributiva: evidenze dalla letteratura | La revisione critica è stata sviluppata a partire dai principali filoni della letteratura internazionale sui rifugi climatici, sulla giustizia climatica e sugli spazi pubblici adattivi; il progetto Ecosister ha successivamente consentito di approfondire e contestualizzare tali evidenze attraverso applicazioni empiriche a scala urbana.

La revisione critica della letteratura svolta in maniera strutturata ha consentito di ricostruire una traiettoria evolutiva articolata del concetto di rifugio climatico, identificando tre distinti stadi (Fig. 1). Nel primo, corrispondente ai primi programmi europei di gestione delle ondate di calore successivi alla crisi del 2003, il rifugio era concepito come spazio interiorizzato, controllato e temporaneo, basato su soluzioni tecnologiche ad alto consumo energetico e inserito in una prospettiva eminentemente reattiva e sanitaria. Il Piano Canicule francese (Ministère de la Santé et de la protection sociale et alii, 2004) rappresenta il modello paradigmatico: edifici pubblici climatizzati, attivati secondo protocolli di emergenza e destinati ad accogliere le popolazioni vulnerabili durante i picchi termici. La stessa logica è stata adottata da numerose città europee, con reti di centri di raffrescamento integrate nei Heat-Health Action Plans (World Health Organization Regional Office for Europe, 2008).

Il secondo stadio (anni 2010) segna il passaggio da una logica emergenziale a un approccio proattivo fondato sulle NbS: le città estendono il concetto oltre gli spazi interni, includendo parchi, cortili di scuole, piazze alberate, portici e aree ombreggiate. La letteratura più recente documenta come il rifugio climatico stia evolvendo da luogo di protezione a infrastruttura di benessere urbano, capace di generare valore ambientale e sociale (Amorim-Maia et alii, 2023; Pede, 2024), configurandosi come nodo di una rete di servizi ecosistemici che contribuisce alla mitigazione del calore, all'equità nell'accesso al comfort termico e alla qualità dell'esperienza urbana (Bulkeley et alii, 2013). L'effetto dell'isola di calore e la sua relazione con le configurazioni morfologiche urbane sono ampiamente do-

cumentati sia in letteratura che nelle sperimentazioni sul campo (Magliocco and Oneto, 2023), così come l'efficacia di microinterventi NbS in contesti scolastici e comunitari nel migliorare il comfort termico locale (Baró et alii, 2022; Tzortzi, Lux and Pardo Delgado, 2024; Sanz-Mas et alii, 2025).

Il terzo stadio identificato nella revisione corrisponde alla ridefinizione del rifugio come infrastruttura relazionale e redistributiva, in cui approcci sistemici basati sull'integrazione acqua / energia / microclima ne rafforzano l'interpretazione come infrastruttura metabolica di cura urbana (Sposito and Mittersteiner, 2025).

Dalla revisione della letteratura emergono tre dimensioni concettuali chiave. La prima è la 'violenza lenta' (Nixon, 2011), cumulativa e spesso invisibile, che il cambiamento climatico esercita in modo sproporzionato sulle popolazioni più vulnerabili, rispetto alle quali i rifugi climatici si configurano come strumenti di contrasto a questa forma di ingiustizia strutturale. La seconda è il rifugio relazionale, uno spazio multispecie, accessibile e sensibile alle soglie climatiche e sociali, che opera come infrastruttura critica di cura urbana (Armondi et alii, 2022), sostenendo la vita quotidiana e incorporando logiche di anticipazione e preparazione (Haraway, 2016). La terza è il Quarto Spazio proposto da Carta (2025), una sfera urbana emergente, ibrida e collaborativa, in cui il rifugio climatico diventa un microecosistema urbano in cui si intrecciano il comfort climatico, l'inclusione sociale e l'attivazione comunitaria.

Un risultato centrale della revisione della letteratura è il rapporto tra rifugio climatico e gentrificazione ecologica. Come evidenziato da Beretta e Cucca (2019) e da una vasta letteratura internazionale sulla gentrificazione ecologica (Bressane, Cunha Pinto and de Castro Medeiros, 2024) le infrastrutture verdi possono produrre esclusioni se non accompagnate da politiche redistributive. La distribuzione delle risorse ambientali costituisce sempre una forma di potere (Anguelovski, 2014; Secchi, 2013; Soja, 2010) e l'evoluzione del rifugio da infrastruttura di emergenza a infrastruttura di benessere implica l'espansione del diritto al comfort come parte integrante del diritto alla città (Harvey, 2008).

Le letterature sulla giustizia spaziale e sulla giustizia energetica (Anguelovski, 2014; Soja, 2010) forniscono il quadro interpretativo all'interno del quale leggere il rifugio climatico come dispositivo redistributivo; le analisi sviluppate nel progetto Ecosister (D4.2.3 – Accessibility as a pre-requisite for inclusive design that aims at spatial justice, energy justice and citizen engagement; analysis of relevant case studies on sustainable and social innovation practice in urban and cultural spaces – Definition of a methodology for an interactive catalogue to activate a generative process) convergono nel definire il rifugio climatico come dispositivo di redistribuzione ambientale e leva per garantire condizioni di vivibilità di base nei quartieri più esposti, riducendo le disuguaglianze in linea con il principio dell'SDG 10. Tali dinamiche confermano l'urgenza di interpretare la giustizia climatica come componente della più ampia giustizia spaziale, in linea con le evidenze recenti sul rapporto tra modelli urbani e accesso equo alle risorse ambientali (Fiorini et alii, 2025). Le sperimentazioni didattiche confermano quanto discusso nella letteratura internazionale sul ruolo dell'apprendimento situato e della ricerca-progetto come strumenti di anticipazione progettuale (Armondi et alii, 2022). In questo quadro le attività sviluppate nell'ambito di Ecosister (D4.2.9 – Climate Shelters and Resilient Public Spaces – Toward an Integrated Network of Adaptation in Consolidated Urban Districts. Spatial Devices for Ecological Transition and Urban Well-Being) offrono un'ulteriore evidenza applicativa.

Il Laboratorio di Advanced Design presso l'Università di Bologna ha sviluppato scenari progettuali per Bologna attraverso una lettura multilivello del territorio, che ha preso le mosse dall'analisi dell'evoluzione storica del paesaggio urbano e delle sue variazioni microclimatiche applicate a zone critiche della città. Questo approccio ha contribuito a consolidare il quadro teorico, da un lato verificando empiricamente il ruolo strategico dei rifugi climatici, rafforzandone la valenza progettuale e il legame con i temi della giustizia spaziale e delle disuguaglianze, dall'altro prefigurando la rete di microecosistemi, poi sistematizzata nel concetto di Green Cell. Il rifugio assume infine una valenza ecologica come nodo della rete ecologica urbana, contribuendo alla continuità vegetale, alla ventilazione naturale, alla mitigazione dell'isola di calore e alla promozione della biodiversità.

Risultati e discussione della Fase 2 – Valutazione prestazionale comparativa: strategie, modelli e lezioni apprese | L'analisi comparativa condotta nel progetto TALEA ha valutato 50 casi studio internazionali di rigenerazione urbana basata sulle NbS (Tab. 2) selezionati per rilevanza, scalabilità e integrazione delle tre dimensioni di innovazione (fi-

Index	Territorial unit	Components / variables	Normalisation	Formula / weighting	Output scale
GFI	Statistical areas (census sections, Bologna Metropolitan Fragility Framework)	Demographic: share of residents aged 80+, population change rate, natural balance Social: single-person households with residents aged 65+, minors in single-parent families, young foreigners, turnover among foreign residents, graduates aged 25-49 Economic: mean taxable income, taxpayers < €10,000, rental housing	Quintilisation per dimension across all statistical areas → 5 categorical classes (1 = low … 5 = high fragility)	GFI = (3·F_econ + 4·F_soc + 3·F_demo) / 10 floor() to nearest integer (weight 4 to social dimension reflects SDG 10 focus)	1 – 5
CFI	Statistical areas (census sections)	3-30-300 rule (Konijnendijk, 2023): 1. ≥ 3 trees visible from each residence 2. ≥ 30% tree-canopy cover in the neighbourhood 3. access to public green space within 300 m Data sources: Sentinel-2 / Google Earth Engine (canopy), DBSN (green areas), OSM (building footprints)	Linear inverse recoding of the number of criteria met: 3 criteria met → 0 (low fragility) 0 criteria met → 4 (high fragility) F_clim∈{0, 1, 2, 3, 4}	No differential weighting between criteria (each criterion treated as equally diagnostic of climate fragility)	0 – 4
GCFI	Statistical areas (vector spatial join GFI layer + CFI layer)	GFI (already normalised, scale 1-5) + CFI (already normalised, scale 0-4) combined at the statistical-area polygon level	Both components already normalised; floor() applied to the weighted sum	GCFI = (1 − λ)·GFI + λ·CFI λ = 0.2 (reference configuration for Bologna) λ is adjustable to calibrate the climate weight to local context	1 – 5
CSI	Individual public green areas (eligibility: SA > 0.5 ha; NDVI > 0.4; free public access) Linked to GCFI via spatial join	SA = surface area (ha) NDVI = Normalised Difference Vegetation Index (Sentinel-2) A = accessibility index (pedestrian / cycling paths, bus stop within a 5-minute walk, parking for users with reduced mobility) DF = drinking-fountain density B = bench density PT = picnic-table density	Variables normalised and weighted by Principal Component Analysis (PCA) – weights reflect each variable's relative contribution to perceived climatic comfort	CSI = SA×0.12 + NDVI×0.04 + A×0.09 + DF×0.27 + B×0.27 + PT×0.21 Spatial join with the GCFI layer assigns each green area the fragility value of the statistical area in which it is located	0 – 1 (continuous)

Tab. 1 | Construction of the GFI, CFI, GCFI and CSI indices: territorial unit, components / variables, normalisation, weighting, formula and layer overlay (source: Maccabiani et alii, 2025 and TALEA D5.2.1; adapted by the Authors, 2026).

sica, tecnologica e sociale). I 50 casi studio sono stati schedati (Fig. 2) e inseriti in un abaco strutturato in 4 blocchi informativi: A (anagrafica e inquadramento), B (vincoli e opportunità), C (processo di progetto, stakeholder, servizi integrati e risultati), D (Nature-based Solutions applicate).

La matrice di valutazione prestazionale comparativa ha consentito di classificare i progetti in base alla tipologia di Green Cell (nodale, lineare, diffusa), alle NbS adottate, alla dimensione prevalente dell'innovazione e al loro potenziale come rifugi climatici. I risultati evidenziano una correlazione significativa tra tipologia di intervento, contesto urbano e potenziale redistributivo, confermando che le soluzioni più efficaci per ridurre le disuguaglianze climatiche sono quelle che integrano la trasformazione fisica, l'attivazione sociale e il supporto digitale in un quadro sistemico.

La Tabella 3 presenta una selezione dei casi studio più rilevanti per il tema dei rifugi climatici, mettendo in evidenza le dimensioni di innovazione e la configurazione spaziale. Sono stati raccolti i casi con maggiore potenziale come rifugio climatico tra i 50 analizzati, selezionati applicando un secondo livello di filtro alla matrice prestazionale: sono stati inclusi i progetti che combinano un punteggio elevato sull'asse del rifugio climatico (presenza di aree ombreggiate, vegetazione, accessibilità e fruizione pubblica libera) con l'attivazione di almeno due delle tre dimensioni di innovazione (fisica, sociale, digitale). Questo criterio discriminante consente di distinguere gli interventi di semplice qualità ambientale da quelli che esprimono un potenziale redistributivo sistemico, evitando che la selezione risulti arbitraria o puramente illustrativa.

L'analisi critica trasversale rivela una tensione strutturale comune a tutte le tipologie: il trade-off tra impatto localizzato e impatto distributivo. Gli interventi nodali, come la rigenerazione di Plaça Sant Antoni a Barcellona (Figg. 3, 4), completata nel 2019 con depavimentazione, alberature mature e sedute ombrate, generano oasi microclimatiche puntuali di alta qualità, con riduzione documentata dell'effetto isola di calore in un raggio di circa 100 metri, nonché processi di coprogettazione attiva e di monitoraggio post-opera. Il loro limite strutturale risiede nell'insufficienza scalare: senza una rete equivalente di nodi, il beneficio rimane circoscritto e rischia di tradursi in 'premium amenity' per il quartiere immediatamente circostante, alimentando i meccanismi di rivalutazione immobiliare documentati in contesti analoghi (Bressane, Cunha Pinto and de Castro Medeiros, 2024).

Il caso di Corte Don Bosco a Bari (2025) offre invece un modello opposto: la scala di quartiere e la modularità dell'intervento (materiali leggeri, reversibili e a basso costo) massimizzano la trasferibilità in contesti a risorse limitate, riducendo le barriere economiche e normative. La limitazione è la minore capacità di mitigazione termica rispetto a interventi con maggiore massa vegetale e permanenza.

Gli interventi lineari mostrano un potenziale redistributivo superiore grazie alla continuità ecologica, ma presentano criticità rilevanti in termini di manutenzione e di governance. Il Corredor Verde Passeig de Sant Joan a Barcellona (2016) rappresenta un caso significativo: combinazione di alberature mature, sedute ombreggiate, riduzione delle corsie carrabili e continuità ecologica con altri no-

Country	City	Title	Year
Albania	Tirana	Skanderbeg Square	2010
Austria	Vienna	Grätzloasen – Neighbourhood Oases	2015
		Re-Sourcing Commons	2021
Belgium	Brussels	Greening of Flagey & Sainte-Croix Squares	2022
	Ghent	Kettingplein	2017
		Green Elderly Care, nature & well-being	2024
China	Guangzhou	Liuyun Xiaoqu District Project	2017
Colombia	Bogotá	Parque Bicentenario	2016
	Medellín	Corredores Verdes (Green Corridors)	2016
Costa Rica	Curridabat	Ciudad Dulce	2015
Denmark	Copenhagen	Sankt Kjelds Plads & Bryggervangen	2019
	Skovlunde	Ballerup Boulevard	2018
France	Bordeaux	Rue-jardin Kléber	2011
	Lyon	Les Berges du Rhône	2008
		Girondins Development Area (ZAC des Girondins)	2011
	Nice	Promenade du Paillon	2013
	Paris	Passage 56 (Le 56 / Eco-interstice)	2005
		Patrick Blanc's Green Wall – Musée du Quai Branly	2005
		Jardin des Joyeux	2016
		Îlots de fraîcheur (Isles of Coolness)	2018
	Reims	Les Promenades	2019
Germany	Berlin	Tempelhofer Feld (Tempelhof Park)	2010
	Freiburg	Freiburg Bächle	Not applicable
		Freiburger Bächle	Non applicabile
	Munich	Brantstraße – Animal-Aided Design	2015

Tab. 2a | Table of case studies of NbS-based urban regeneration (credit: the Authors, 2026).

di della rete verde cittadina (Fig. 5). La scalabilità lineare, cioè la stessa formula replicabile su qualsiasi asse stradale alberabile, è il punto di forza principale; la debolezza è il lungo tempo di maturazione biologica e gli alti costi di manutenzione, che lo rendono accessibile principalmente ad Amministrazioni con bilanci municipali robusti.

Les Berges du Rhône a Lione (2008), pur essendo un caso di grande impatto sulla qualità dello spazio pubblico fluviale, presenta una dipendenza specifica dalla morfologia idrogeologica, ovvero dalla presenza di un grande fiume, che ne limita drasticamente la trasferibilità ai contesti urbani privi di corsi d'acqua significativi.

Il modello diffuso è il più coerente con una logica redistributiva, ma anche il più complesso da governare. Il programma Climate Shelters Schools di Barcellona (López Plazas et alii, 2023; Sanz-Mas et alii, 2025; Baró et alii, 2022) è il caso più documentato e replicabile: interventi standardizzati in 21 cortili scolastici con protocollo di apertura pubblica durante le ondate di calore, monitoraggio delle temperature e impatto misurabile sulla salute comunitaria. I punti di forza sono la replicabilità del protocollo su edifici diversi, l'integrazione con il sistema educativo e l'accessibilità universale. Le limitazioni riguardano la dipendenza dal calendario scolastico (chiusura estiva degli edifici) e la necessità di accordi istituzionali stabili tra il Comune e gli Istituti.

I Corredores Verdes di Medellín (2016) rappresentano il caso più avanzato di rete diffusa a scala metropolitana: 36 km di assi verdi, riduzione documentata dell'isola di calore fino a 3 °C e governance multilivello. Tuttavia la trasferibilità al contesto europeo è parziale: il modello si è sviluppato in una condizione di profonda ingiustizia spaziale e ha richiesto investimenti pubblici straordinari difficilmente replicabili senza forte volontà politica e risorse dedicate.

L'importanza dei cortili delle scuole come micro-rifugi climatici è confermata anche dagli sviluppi recenti che evidenziano il ruolo delle NbS nel miglioramento del comfort termoigrometrico locale (Tzortzi, Lux and Pardo Delgado, 2024). Il confronto trasversale consente anche di formulare alcune lezioni critiche per il framework bolognese. La qualità ecologica non garantisce l'equità redistributiva: è necessario un indirizzo esplicito verso i quartieri più fragili, come reso operativo dal GCFI. Inoltre la governance è il fattore abilitante più critico e meno replicabile: i casi di maggiore successo presentano strutture di gestione partecipativa stabili e preesistenti, condizione che il modello TALEA incorpora nella dimensione sociale dell'innovazione. Infine la reversibilità e la modularità degli interventi aumentano la trasferibilità, ma riducono la prestazione microclimatica; ne consegue che il compromesso deve essere calibrato esplicitamente in funzione del contesto, della densità urbana e dell'entità della fragilità climatica.

Dall'analisi sintetizzata nella Tabella 4 emergono quattro strategie ricorrenti con implicazioni dirette per la concezione del rifugio climatico come infrastruttura di equità. La prima è la depavimentazione e rinaturazione dei suoli, adottata in progetti come il Corredor Verde (2016) a Barcellona (Fig. 6), Skanderbeg Square (2010) a Tirana e Corte Don Bosco (2025) a Bari, dove la rimozione delle superfici impermeabili costituisce il primo passo per

Country	City	Title	Year
Hungary	Budapest	CoolCo's – Cooling Corners & Corridors	2023
Italy	Bari	Corte Don Bosco	2025
	Bologna	Temporary Setup Piazza Rossini	2020
	Milan	Bosco Verticale (Vertical Forest)	2014
	Turin	Orto WOW	2019
Mexico	Mexico City	Linear Park Ferrocarril de Cuernavaca	2017
Netherlands	Amsterdam	SET Community Gardens	2014
	Rotterdam	Watersquare Benthemplein	2013
		Little C	2018
	Utrecht	Catharijnesingel Canal Re-opening	2000
		Rijnvliet Edible Neighbourhood (REN)	2022
Peru	Lima	Invasión Verde (Green Invasion)	2010
Poland	Kraków	Anti-smog Educational Garden	2017
Spain	Barcelona	Corredor Verde Passeig de Sant Joan	2016
		Plaça Sant Antoni (Superilla Sant Antoni)	2019
	Bilbao	Calle María Díaz de Haro – Climate-Adapted Green Corridor	2023
	Madrid	Proyecto MICOS	2016
	Seville	Gardens in the Air (Jardines en el Aire)	2021
	Valladolid	Green Noise Barrier – Urban GreenUP	2018
Sweden	Stockholm	Hammarby Sjöstad eco-urban neighbourhood	2018
Switzerland	Basel	Winkelriedplatz	2018
Turkey	Eskişehir	Hamamyolu Urban Deck	2018
United Kingdom	London	Bankside Urban Forest	2007
		Trees for Trees platform	2021

Tab. 2b | Table of case studies of NbS-based urban regeneration (credit: the Authors, 2026).

la creazione di rifugi climatici naturali. La seconda è l'impiego di arredi verdi modulari e strutture mobili, come nel progetto CoolCo's (2023) a Budapest, che offre soluzioni plug-and-play ad alta flessibilità e immediatamente replicabili per creare aree temporanee di raffrescamento durante le ondate di calore.

La terza è l'integrazione di infrastrutture verdi-blu multifunzionali, esemplificata dal Watersquare Benthemplein (2013) a Rotterdam, dove la piazza assolve contemporaneamente funzioni ricreative, di ritenzione idrica e di comfort termico; l'approccio verde-blu risulta coerente con le letture più recenti che interpretano il raffrescamento urbano come un processo metabolico integrato basato sulle relazioni tra acqua, energia e microclima (Sposito and Mittersteiner, 2025). La quarta è il modello di rete diffusa di microinterventi, che rappresenta l'approccio più coerente con la visione del rifugio come infrastruttura redistributiva: i Corredores Verdes (2016) di Medellín, il programma Climate Shelters Schools (2018-2030) di Barcellona e i SET Community Gardens (2014) di Amsterdam dimostrano come le reti capillari possano estendere i benefici climatici anche alle comunità più marginali.

Un risultato trasversale di particolare rilevanza per l'SDG 10 è il rischio di gentrificazione ecologica. L'analisi conferma che gli interventi di elevata qualità localizzati in aree centrali e a finanziamento privato, come il Bosco Verticale (2014) di Milano, tendono a beneficiare popolazioni a reddito elevato, mentre i progetti più efficaci nel ridurre le disuguaglianze sono quelli che operano a scala diffusa nei contesti periferici e vulnerabili, come i Corredores Verdes (2016) di Medellín. Questa evidenza rafforza la tesi centrale del contributo: il rifugio climatico deve essere concepito come rete capillare e accessibile, non come intervento puntuale di eccellenza.

L'analisi comparativa evidenzia inoltre che circa la metà dei progetti analizzati integra forme di innovazione digitale (piattaforme GIS, sensori ambientali, scienza partecipata), ma nessuno di essi implementa ancora un gemello digitale completo. Questo dato conferma la posizione del progetto TALEA come avanguardia nell'integrazione delle tre dimensioni di innovazione: nessun caso analizzato combina simultaneamente NbS, co-design comunitario e monitoraggio digitale in tempo reale all'interno di un'unità modulare replicabile.

Tra i fattori chiave abilitanti emergono la collaborazione tra Università e Amministrazioni locali, l'approccio pilota incrementale con interventi reversibili, la governance intersettoriale e l'integrazione delle NbS in strategie urbane di lungo periodo. I principali ostacoli riguardano la disponibilità limitata di spazio fisico nei centri storici, la manutenzione a lungo termine delle NbS, le tensioni tra sperimentazione e rigidezza dei quadri istituzionali e il rischio di perdita del coinvolgimento della comunità nel medio e nel lungo periodo. Queste criticità confermano quanto osservato anche nella letteratura sui processi di coprogettazione di spazi pubblici e di welfare, per cui si evidenzia la necessità di strutturare governance stabili per garantire continuità e manutenzione nel tempo (Campagnaro et alii, 2025).

Risultati e discussione della Fase 3 – La sperimentazione di Bologna: dalla diagnosi alla localizzazione strategica | Bologna costituisce il campo di verifica del framework sviluppato nelle prime due fasi. Situata in una fascia climatica caratterizzata da estati calde e umide, la città registra un significativo aumento delle ondate di calore: rispetto al periodo 1961-1990, la temperatura media annua è prevista in aumento da 13,9 a 15,6°C nella finestra 2020-2050, con ondate di calore di 6 giorni consecutivi e 42 notti tropicali estive (dati dell'Osservatorio Clima Regione Emilia-Romagna[3]). Più del 50% del territorio comunale presenta una risposta idrologica scarsa e le ondate di caldo sono amplificate dall'effetto isola di calore, con impatti rilevanti soprattutto nei quartieri con maggiore densità abitativa.

L'applicazione del framework GCFI al territorio bolognese ha prodotto risultati significativi sulla distribuzione spaziale delle vulnerabilità. Il General Fragility Index (GFI), elaborato a partire dal framework di fragilità metropolitana del Comune di Bologna[4], integra tre dimensioni: demografica (percentuale di residenti over 80, tasso di variazione della popolazione e bilancio naturale), sociale (famiglie unipersonali over 65, minori in famiglie monogenitoriali, giovani stranieri, turnover straniero e laureati 25-49 anni) ed economica (reddito medio imponibile, contribuenti con reddito sotto i 10.000 euro e alloggi in affitto).

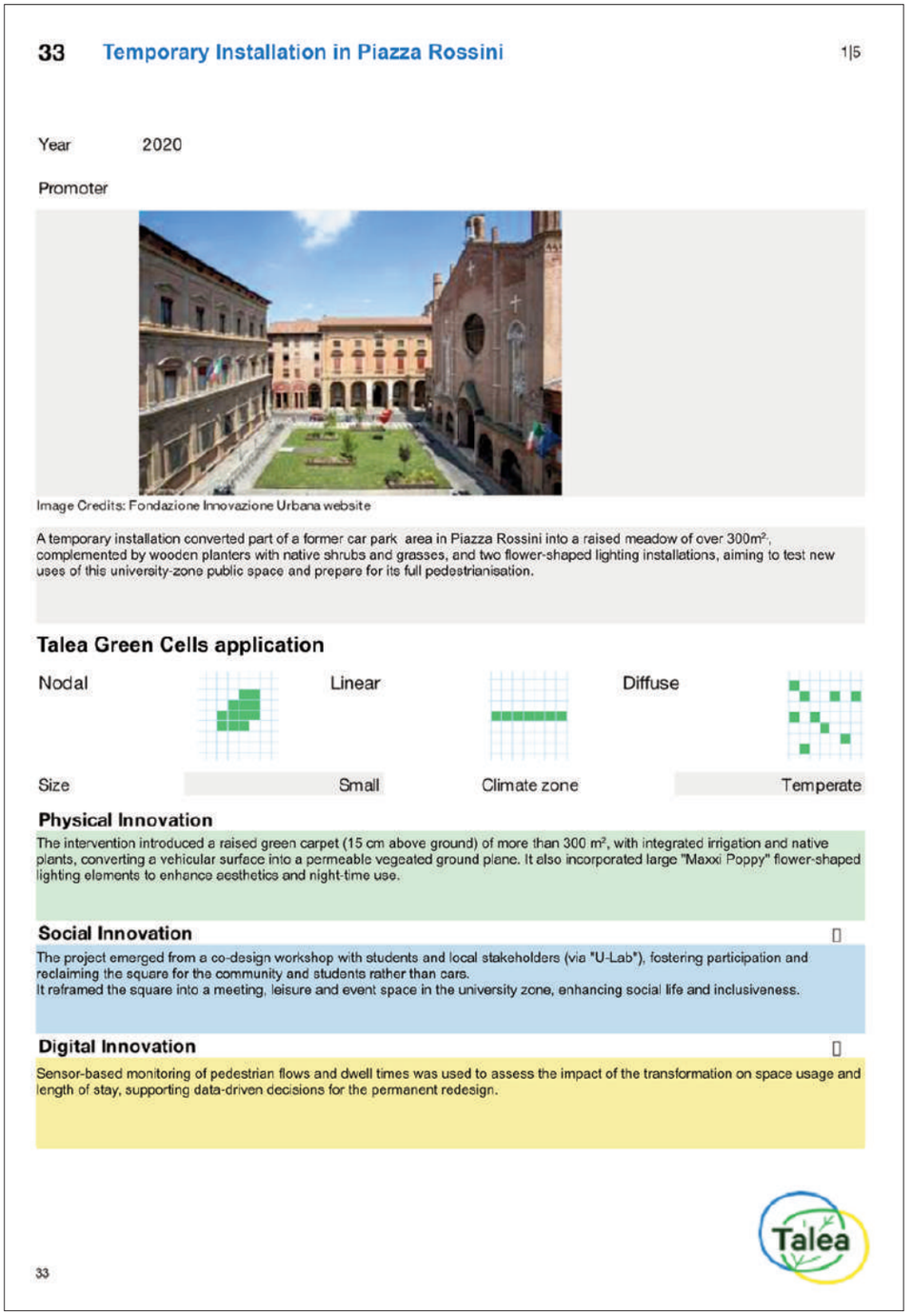


Fig. 2 | First framing page of the record sheet of a case study of NbS-based urban regeneration analysed in the TALEA project (credit: TALEA project; adapted by the Authors, 2025).

Le tre dimensioni sono aggregate e ponderate in un indicatore sintetico che classifica le aree statistiche in cinque livelli di fragilità. La componente demografica del GFI, in particolare la quota di residenti ultraottantenni e la prevalenza di famiglie unipersonali anziane, esprime la fragilità documentata dalla letteratura recente sul nesso tra invecchiamento della popolazione, stress termico e benessere negli spazi urbani (Chaza Chimeno, Revellini and Cellucci, 2024): le sezioni censuarie con GFI elevato coincidono con le aree di maggiore esposizione al rischio da calore e di minore autonomia di accesso ai rifugi climatici.

Il Climate Fragility Index (CFI), calcolato secondo la regola 3-30-300, misura la qualità delle infrastrutture verdi locali in base a tre criteri complementari: visibilità di almeno 3 alberi da ogni residenza, copertura arborea minima del 30% nel quartiere, accesso a un'area verde pubblica entro 300 metri (Fig. 7). L'implementazione ha utilizzato immagini Sentinel-2 elaborate in Google Earth Engine per derivare la densità di copertura arborea, in combinazione con le geometrie delle aree verdi pubbliche (DBSN) e le impronte degli edifici residenziali (OpenStreetMap). Le aree che soddisfano meno criteri risultano più fragili climaticamente.

L'integrazione nel GCFI ha rivelato come l'inclusione del fattore climatico modifichi in modo significativo i pattern di vulnerabilità, soprattutto nei quartieri densi con copertura arborea limitata e bassa conformità alla regola 3-30-300. Le criticità climatiche non sono distribuite in modo uniforme, ma si concentrano in aree consolidate della città dove vulnerabilità ambientali e sociali si sovrappongono, generando situazioni di ingiustizia climatica.

Il Climate Shelter Index (CSI), sviluppato secondo la metodologia di Maccabiani et alii (2025), ha valutato la capacità delle aree verdi pubbliche di funzionare come rifugi climatici. L'indice assegna a ciascuna area un valore tra 0 e 1, calcolato come combinazione ponderata di: superficie (aree > 0,5 ha), indice di vegetazione NDVI (> 0,4), accessibilità (percorsi pedonali / ciclabili, fermata autobus entro 5 minuti e parcheggi per disabili), densità di fontanelle, panchine e aree di sosta (Fig. 8). La procedura completa di costruzione del CSI (formula, ponderazioni, criteri di eleggibilità e modalità di connessioni spaziali con il layer GCFI) è illustrata nella Tabella 1 della sezione Metodologia.

Utilizzati congiuntamente, GCFI e CSI formano un framework analitico a due scale: il GCFI identifica dove si concentra la fragilità urbana e il CSI individua quali spazi specifici all'interno delle zone fragili possiedono il potenziale per diventare rifugi climatici e come interventi mirati possano potenziarne la funzione di resilienza.

Le aree pilota del progetto TALEA, dove verranno realizzate le Green Cell, sono state selezionate sovrapponendo i livelli di fragilità climatica, di vulnerabilità sociodemografica e di reti ecologiche urbane, nonché le proposte dei cittadini, raccolte attraverso il Bilancio Partecipativo di Bologna[5]: esse sono state localizzate nel settore nord del centro storico (zona Marconi) e nel quartiere Fossolo (Figg. 9, 10). L'implementazione delle Green Cells in questi contesti, concepite come una nuova forma di rifugio climatico modulare e replicabile, mira a creare una connessione spaziale ed ecologica tra le aree pilota e il progetto municipale Impronta Verde[6], dimostrando come gli interventi localizzati possano generare impatti sistemici sulla qualità microclimatica e sulla giustizia spaziale. La logica incrementale, ispirata alla propagazione vegetale della talea, consente a ogni intervento di attecchire, crescere e moltiplicarsi, dando origine a una rete di rifugi climatici in continua espansione.

Sul piano funzionale e spaziale le Green Cells sono declinabili in tre configurazioni tipologiche: nodale (un intervento puntuale concentrato in piazze, corti o slarghi), lineare (lungo assi stradali, percorsi pedonali o bordi ciclabili) e diffusa (come rete capillare di microinterventi coordinati a scala di quartiere). La selezione delle NbS, in particolare delle specie arboree e arbustive, segue criteri di resilienza climatica e di compatibilità con il contesto storico-paesaggistico bolognese (particolarmente delicato in centro storico), ed è guidata dalle simulazioni microclimatiche che consentono di analizzare le condizioni di comfort attuali e prefigurare le migliori strategie di miglioramento (Fig. 11).

L'innovazione digitale, in particolare il Systemic Urban Observation Atlas[7], trasforma la mappatura da strumento interpretativo a processo trasformativo, consentendo di valutare in tempo reale gli effetti distributivi degli interventi e di orientare azioni correttive per garantire che i benefici delle Green





Figg. 3, 4 | Superilla Peatonal Sant Antoni and Plaça Sant Antoni in Barcelona (credits: R. Roversi, 2026).



Fig. 5 | Corredor Verde Passeig de Sant Joan in Barcelona (credit: R. Roversi, 2026).

Next page

Fig. 6 | Superilla Plaza-Jardín Rocafort (credit: R. Roversi, 2026).

Cells raggiungano effettivamente le comunità più vulnerabili.

La progettazione delle Green Cells integra criteri di Design for All verificabili: accessibilità fisica conforme alla norma EN 17210:2021[8], sistemi di orientamento inclusivo, prossimità a fermate del trasporto pubblico locale (entro 5 minuti a piedi), parcheggi per utenze a mobilità ridotta, sedute ergonomiche e fontanelle. La governance prevede orari di apertura estesi durante le ondate di calore, manutenzione ordinaria programmata e gestione partecipativa con le comunità residenti, secondo un modello coerente con le esperienze di presidio e assistenza di prossimità (Pollo, Biolchini and Scognamiglio, 2023; Setola and Borgianni, 2025).

La sostenibilità a lungo termine delle Green Cells richiede modelli di governance ibridi che combinino il sostegno istituzionale pubblico e la partecipazione comunitaria strutturata. Il campione dei 23 casi studio europei, riferimento individuato nel deliverable TALEA 'D5.3.1 – Integrative Governance and Financial Guide for the Sustainability of Green Transition' (R2M Solution, 2025), dimostra che le configurazioni ibride, che integrano coordinamento municipale, co-gestione multiattore e strumenti digitali di monitoraggio, risultano le più efficaci per garantire durabilità e scalabilità delle infrastrutture verdi modulari.

Per il contesto bolognese, ciò si traduce nella formalizzazione di accordi di 'stewardship' e 'RACI matrix' (Responsible / Accountable / Consulted / Informed) per la distribuzione delle responsabilità di manutenzione tra Comune, partner di progetto e comunità residenti, nell'attivazione del TALEA Future Lab come hub permanente di governance partecipata e formazione civica e nell'integrazione con il Bologna Digital Twin per il monitoraggio adattivo degli impatti redistributivi degli interventi, in linea con il Climate City Contract e il programma Impronta Verde (Fig. 12).

Sinergie e compromessi con gli SDG | Il contributo si inscrive principalmente nell'SDG 10 (Ridurre le disuguaglianze), interpretando il rifugio climatico come dispositivo di redistribuzione ambientale capace di contrastare le asimmetrie nell'esposizione al rischio termico e nell'accesso al comfort urbano. Le sinergie più forti si attivano con l'SDG 3 (Salute e benessere), poiché la mitigazione dello stress termico incide sulla mortalità delle popolazioni vulnerabili, con l'SDG 11 (Città sostenibili), configurando la rete di rifugi come infrastruttura permanente integrata nella pianificazione e con l'SDG 13 (Lotta al cambiamento climatico), rafforzando la capacità adattiva locale attraverso le NbS. Si individuano sinergie rilevanti con l'SDG 9 (Innovazione e infrastrutture), per il carattere innovativo del framework GCFI-CSI e dell'integrazione digitale, con l'SDG 15 (Vita sulla terra), per il contributo alla biodiversità e continuità ecologica, con l'SDG 4 (Istruzione), per il ruolo dei cortili scolastici come rifugi climatici e spazi di educazione ambientale (Barcellona, Parigi) e con l'SDG 6 (Acqua), attraverso le infrastrutture verdi-blu.

Sinergie indirette si riscontrano con gli SDG 1, 5, 4, 6, 7 e 17. La riduzione dei costi sanitari legati allo stress termico alleggerisce il peso della povertà sulle famiglie più vulnerabili (SDG 1). Il caldo estremo colpisce in modo differenziato le donne e spazi pubblici termicamente confortevoli e sicuri contribuiscono a ridurre questa asimmetria di genere (SDG 5). Il ruolo dei cortili scolastici come rifugi climatici e spazi di educazione ambientale contribuisce all'alfabetizzazione ambientale (SDG 4); la riduzione del fabbisogno di raffrescamento meccanico riduce i consumi energetici (SDG 7); la governance multilivello tra Università, Amministrazioni pubbliche e comunità costituisce il presupposto istituzionale del modello (SDG 17).

I compromessi riguardano l'SDG 8, per le tensioni tra la valorizzazione degli spazi e la gentrificazione ecologica, e l'SDG 12, per le risorse necessarie alla manutenzione delle NbS. Relazioni deboli o non pertinenti si riscontrano con gli SDG 2, 14 e 16. La relazione con SDG 2 è marginale: le Green Cells possono includere orti comunitari, ma la produzione alimentare non è un obiettivo centrale del framework e il contributo alla sicurezza alimentare è trascurabile alla scala di intervento considerata. La relazione con l'SDG 14 (Vita sott'acqua) è anch'essa molto debole: le infrastrutture verdi-blu riducono l'apporto di inquinanti nei corsi d'acqua superficiali, ma gli ecosistemi marini e costieri non sono toccati in modo significativo. La relazione con l'SDG 16 (Pace, giustizia e istituzioni) è presente come sfondo istituzionale (i processi partecipativi e la governance multilivello sono componenti esplicite del modello), ma non costituisce asse di innovazione primario del contributo (Tab. 5).

Conclusioni, limiti e trasferibilità | Il percorso di ricerca ha messo in luce come il rifugio climatico possa rappresentare un dispositivo urbano complesso, capace di integrare dimensioni ecologiche, sociali e spaziali nella riduzione delle disuguaglianze. La sua evoluzione concettuale, da spazio chiuso e refrigerato a infrastruttura diffusa di benessere microclimatico, riflette una trasformazione nel modo in cui le città possono rispondere agli impatti del cambiamento climatico, promuovendo forme di vita urbana più eque e resilienti. Le sperimentazioni di Bologna, condotte attraverso la convergenza tra i progetti Ecosister e TALEA, contribuiscono a dimostrare come l'integrazione di indicatori quantitativi e qualitativi, strumenti digitali avanzati e metodologie di co-design possa orientare la localizzazione strategica di rifugi climatici, anche in contesti delicati e vincolati come il centro storico.



Il modello delle Green Cells offre una soluzione operativa scalabile e replicabile, volta a ricucire le discontinuità delle infrastrutture verdi e a generare effetti diffusi di mitigazione e rigenerazione. Come argomentato da Macaluso e Palma (2025) in riferimento alle infrastrutture vegetali come dispositivi progettuali per la salute e l'uguaglianza, il comfort termico e l'accesso ai benefici ecosistemici sono questioni di redistribuzione prima ancora che di mitigazione ambientale: il rifugio climatico accessibile è pertanto un presupposto del diritto alla salute e alla vivibilità urbana, non un servizio aggiuntivo per chi già ne ha la possibilità.

La ricerca, che il progetto TALEA permette di tradurre a livello operativo, suggerisce che l'approccio sistemico a rete, integrando le dimensioni fisiche, digitali e sociali, consente di contrastare i fenomeni di gentrificazione ecologica e di garantire che i benefici della transizione verde non si traducano in nuove forme di esclusione, in coerenza con il principio di 'non lasciare indietro nessuno' promosso dall'Agenda 2030 (UN, 2015). In questa prospettiva una sinergia particolarmente significativa si delinea con il progetto Linee d'Ombra – Itinerari Climatici sotto i Portici[9], approvato dalla Giunta comunale di Bologna nel febbraio 2026 e cofinanziato dal Ministero della Cultura. Il progetto interpreta i 62 chilometri di portici bolognesi, Patrimonio Mondiale UNESCO, come una rete ombreggiata di collegamento tra i rifugi climatici urbani, aggiornando, in chiave di adattamento climatico, il concetto storicamente associato a tali infrastrutture. La complementarità tra le Green Cells di TALEA, che operano sui nodi della rete climatica, e Linee d'Ombra, che interviene sulle connessioni lineari attraverso i portici, prefigura un modello integrato in cui rifugi puntuali e corridoi climatici si radicano nel Patrimonio storico della città.

Tra i limiti della ricerca si segnalano il carattere ancora iniziale delle sperimentazioni di TALEA, avviate a dicembre 2024, che non consente di disporre di dati post-implementazione sugli effetti di mitigazione termica, la dipendenza degli indicatori dalla risoluzione e dalla disponibilità dei dati geospaziali e l'assenza di una validazione esterna in contesti diversi da Bologna. Le principali barriere alla diffusione dell'approccio includono invece la resistenza culturale al cambiamento delle pratiche urbanistiche consolidate, la rigidezza dei quadri normativi nei confronti delle sperimentazioni nello spazio pubblico, in particolare nei centri storici vincolati, e il rischio di perdita del coinvolgimento della comunità locale nel medio e nel lungo periodo, che richiede strutture di governance partecipativa stabili.

Sul piano della trasferibilità il framework di TALEA e il modello delle Green Cells sono concepiti per essere adattati a contesti diversi, a condizione che siano disponibili dati geospaziali e sociodemografici comparabili. La natura stessa delle European Urban Initiatives, di cui TALEA fa parte in qualità di progetto vincitore del bando Greening Cities, prevede che la metodologia e le soluzioni sperimentate abbiano un elevato grado di trasferibilità. Per questo motivo gli sviluppi futuri prevedono la loro applicazione alle città transfer (Marsiglia, Riga, Cluj-Napoca), con il necessario adattamento al diverso contesto climatico, istituzionale e socioculturale.

Resta aperta la questione cruciale della sostenibilità del modello a rete nel lungo periodo: il 'diritto al comfort' come diritto urbano richiede impegni strutturali di manutenzione e di governance che trascendono il ciclo di vita dei singoli progetti di ricerca, evidenziando la necessità di un radicamento istituzionale delle pratiche sperimentate.

Climate change is aggravating inequalities in urban areas, disproportionately exposing the most vulnerable populations to extreme temperatures and intense weather events (IPCC, 2023; Nazish, Abbas and Sattar, 2024). In contexts marked by socioeconomic and cultural asymmetries, where vulnerabilities overlap according to intersectional log-

ics, public space can serve as adaptive infrastructure capable of counteracting such injustices, offering accessible and non-discriminatory climatic resources. The right to climate protection and thermal comfort thus intertwines with issues of spatial (Mitchell, 2003) and energy justice, highlighting how the distribution of socio-environmental opportunities is strongly influenced by settlement models (Fiorini et alii, 2025). This dynamic is particularly acute for elderly populations: recent literature documents how exposure to extreme heat combines with reduced mobility and social isolation, making this demographic group the most exposed to thermal risk and the least able to access spaces of protection autonomously (Chaza Chimeno, Revellini and Cellucci, 2024). The accessible climate shelter therefore responds to a situated and not generic fragility, with strong relevance for SDG 3 and SDG 10.

Within this framework, the concept of the 'climate shelter' has evolved from an emergency space to a permanent infrastructure of urban well-being, capable of redistributing environmental benefits and reducing forms of climate marginalisation (Amorim-Maia et alii, 2023). This evolution fits coherently within the debate on in-between spaces as climatic devices able to modulate thermal and social dynamics in the contemporary city (Tucci, Altamura and Pani, 2023). In this regard, this article proposes a redefinition of the climate shelter through a systemic and relational perspective, interpreting it as a device of spatial justice and an operational instrument for the reduction of inequalities, in line with SDG 10. In light of these premises, the contribution critically reconstructs the evolution of the climate shelter through the literature and selected international case studies, defining a theoretical framework consistent with current challenges of climate and spatial justice. This framework engages with the experimental activities conducted in Bologna within the PNRR Ecosister – Territorial Innovation Ecosystem of Emilia-Romagna (ECS_00000033) project and the European TALEA – Green Cells Leading the Green Transition (EUI02-064) project. The latter has translated the concept of the climate shelter into a series of operational and scalable devices, called Green Cells, modular urban micro-ecosystems that represent a new form of climate shelter, combining Nature-based Solutions (NbS), social innovation, and technological innovation to produce widespread effects of thermal mitigation and urban regeneration (Roversi and Longo, 2025).

The article therefore aims to highlight the potential of the climate shelter as a redistributive urban infrastructure, capable of integrating NbS, social innovation, and digital tools, offering relevant insights for the scientific community in the fields of ecological transition, urban design and the debate on spatial justice. In this perspective, the climate shelter is not only a functional outpost of thermal protection, but a component of a broader, adaptive, and redistributive urban infrastructure, rooted in the transformation of public space as a design response to the ecological crisis (Berretta, Desideri and Staltari, 2024). The article is structured into three sections: the first reconstructs the theoretical framework from the literature; the second presents the comparative evaluation of 50 international case studies; the third illustrates the Bologna experimentation. The originality of the article lies in proposing the climate shelter as a permanent redistributive infrastructure, overcoming the existing literature that treats it predominantly as an emergency device, and in its operational transposition through the concept of the Green Cell. This approach aims to offer the scientific community a replicable framework for integrating climate justice and urban design.

Methodology | The research adopts an integrated approach, structured into three complementary phases, consistent with the methodological framework of the TALEA project, which structures urban innovation in the three physical, social, and digital dimensions.

Phase 1 – Structured critical literature review and theoretical framework. The first phase consists of a review of the international scientific literature on the topic of climate shelters, aimed at reconstructing the evolution of the concept, from emergency space to permanent infrastructure of urban well-being, and at defining the theoretical framework linking climate shelter, spatial justice and the reduction of inequalities.

The review adopted a critical and structured approach, aimed at ensuring transparency and tra-

Case study	City	TGC type	Physical innovation	Social innovation	Digital innovation	Climate shelter
Climate Shelters in Schools programme (2019-22)	Barcelona	Widespread	Green-blue-grey NbS in 11 school courtyards: depaving, trees, pergolas, and water features	Co-design with school communities; opening schoolyards to the neighbourhood; environmental education	Pre- / post-intervention microclimate monitoring; open-data platform	Formalised network
Corredor Verde Pass eig de Sant Joan (2016)	Barcelona	Linear	Depaving, tree-lined corridor, filter planting beds, and permeable paving	Pedestrianisation; soft mobility; play areas and rest areas	N/A	Continuous climate corridor
Oasis project (2020-22)	Paris	Widespread	Transformation of school playgrounds with green-blue-grey NbS and green roofs	Co-design with pupils and families; opening of the oasis to the neighbourhood	Microclimate sensors; participatory platform	Neighbourhood cooling oasis
Heating & Cooling 2050 Plan	Bilbao	Widespread / Linear	Green corridors, expansion of shaded areas, water systems, and green streets	Integration into strategic urban planning	Thermal hotspot mapping; multi-level GIS	Widespread climate quality in public space
CoolCo's Cooling Corners (2023)	Budapest	Nodal	Mobile modular structures; vegetated panels; misting systems; textile shading	Living lab; co-design with citizens; New European Bauhaus	Thermal-imaging cameras; pre- / post-intervention climate sensors	Temporary cooling corners
Corredores Verdes (2016–20)	Medellín	Linear	30 green corridors; urban forestry; reduction in surface temperature by up to 3 °C	Inclusion of vulnerable groups; training for young people at risk	N/A	Metropolitan-scale climate corridors
Corte Don Bosco (2025)	Bari	Nodal	127 trees, permeable soil, continuous green canopy, and garden-square	G124 Renzo Piano; co-design with Universities and residents	N/A	Local climate shelter prototype
Watersquare Benthemplein (2013)	Rotterdam	Nodal	Multifunctional square: recreational area and rainwater-retention basin	Community space; cultural events; sports	Water level sensors; automated management	Integrated water-based thermal-comfort shelter
SET Community Gardens (2014)	Amsterdam	Widespread	Urban gardens, mobile containers, greening of courtyards, and lightweight structures	Inclusion of migrants; co-management; intercultural cohesion	N/A	Community micro-shelters

Tab. 3 | Table selecting case studies from the TALEA benchmarking: dimensions of innovation and potential as a climate shelter (credit: the Authors, 2026).

ceability in the process of collecting and selecting sources. The Scopus and Google Scholar databases were consulted, supplemented by institutional documents (WHO, IPCC, EEA) and technical reports relevant to the themes of climate justice, extreme heat, Nature-based Solutions, and adaptive public space. The time span considered extends from 2003 – the year of the European heatwave that represents the turning point in adaptation policies – to 2025.

The inclusion criteria concerned thematic relevance to climate justice, urban vulnerability, NbS, and adaptive public space, availability in English and Italian, reference to urban contexts, and the peer-reviewed nature of scientific contributions. Studies relating to rural contexts or focused on climate risks other than extreme heat were excluded. Final selection took place through progressive reading by title, abstract, and full text, privileging contributions with a strong empirical or theoretical anchorage to the research themes.

The review content was further deepened within the Ecosister project through a multi-level and integrated reading of urban space, applied to specific areas of the City of Bologna, based on the analysis of the historical evolution of the urban landscape and its microclimatic variations. This approach made it possible to restore greater design depth to the concept of the climate shelter, strengthening its link with the themes of spatial justice and inequality. Official documents of international bodies and peer-reviewed sources were privileged, with particular attention to the European and Mediterranean literature on climate justice, NbS, 'slow violence' and urban adaptation.

Phase 2 – Comparative analysis of case study performance. The second phase involves a comparative analysis of international case studies selected through a structured comparative performance evaluation matrix developed within the TALEA project. The matrix evaluates 50 NbS-based urban regeneration projects according to the criteria of scale of intervention, type of Green Cell (nodal, linear, or diffused), spatial configuration, adopted NbS, dimensions of physical, social, and digital innovation, barriers and enabling factors, replicability, and potential as a climate shelter. This phase makes it possible to identify recurring strategies and lessons learned transferable to the Bologna context.

The case studies were selected on the basis of four explicit criteria, defined in deliverable D5.1.1 of the TALEA project. The first criterion is recognition as an international best practice: projects awarded or cited in the scientific literature for their innovative contribution to NbS-based urban regeneration were included, with particular attention to those integrating multiple types of solutions in order to maximise environmental and social co-benefits and demonstrating compatibility with sensitive contexts (historic centres, consolidated areas). The second criterion is coverage of the urban scales of the TALEA project: from the scale of the block and neighbourhood (superblocks, block interventions) to the urban and metropolitan scale (green networks, afforestation plans), also including punctual interventions of experimental quality.

The third criterion is the combination of multiple dimensions of innovation: not only high-quality physical interventions, but also integrated social components (participatory processes, socially innovative uses) and/or digital tools (smart technologies for monitoring and management), since the coordinated activation of multiple levers is a fundamental condition for enabling ecological transition at urban scale. The fourth criterion is the integration of multiple complementary NbS: projects combining different elements (trees, water elements, permeable surfaces, vertical greenery) were privileged over those based on a single solution. The selection includes projects from heterogeneous climatic contexts (Central Europe, Mediterranean area, Latin America) and from differentiated urban fabrics (historic centres, suburbs, reuse areas), guaranteeing the geographic and morphological representativeness necessary to extract lessons transferable to the Bologna context.

Phase 3 – Experimentation in Bologna: indicators and strategic localisation. The third phase focuses on the experimental activities conducted in Bologna, where the convergence among the studies brought together within the TALEA project, in particular that of consortium partner Fondazione Bruno Kessler[1], made it possible to develop multi-level mappings of social vulnerability and climate fragility based on three composite indicators: the

Theme / strategy	Description	Evidence from the sample (n=50)
General structural framework	Climate shelters mainly focus on open spaces and integrated infrastructure rather than isolated buildings. The most common combination is open space + infrastructure.	Open space: 44/50; Infrastructure: 37/50; Building: 12/50; Open space + Infr.: 27/50
1. Depaving and soil renaturalisation	Removal of impermeable surfaces as a first step towards creating natural climate shelters. Examples: Corredor Verde (Barcelona), Skanderbeg Square (Tirana), Corte Don Bosco (Bari).	Constraints relating to impermeable surfaces: 40/50 (80%); Underground utilities: 20/50 (40%); Constrained spaces: 19/50 (38%); NbS – depaving: 24/50 (48%); Permeable paving: 27/50 (54%)
2. Modular green furnishings and mobile structures	Highly flexible plug-and-play solutions for temporary cooling corners during heatwaves. Example: CoolCo's (Budapest).	Seating and rest areas: 32/50 (64%); Shaded areas/cool spots: 26/50 (52%); Integrated green furnishings: 17/50 (34%)
3. Multifunctional green-blue infrastructure	Integration of recreational functions, water retention, and thermal comfort in a single space. Example: Watersquare Benthemplein (Rotterdam).	Bioretention areas: 12/50 (24%); filter trenches: 9/50 (18%); Rain gardens: 8/50 (16%); Technical standards/norms: 31/50 (62%); Public-land regulations: 31/50 (62%)
4. Widespread network of micro-interventions	Redistributive capillary networks that extend climate benefits to marginalised communities. Examples: Corredores Verdes (Medellín), Climate Shelters in Schools (Barcelona), SET Community Gardens (Amsterdam).	Urban regeneration: 42/50 (84%); Sense of community: 39/50 (78%); Well-being: 44/50 (88%); Social cohesion: 43/50 (86%); Civic participation: 33/50 (66%)
Risk of ecological gentrification	Structural tension between punctual interventions of excellence and widespread infrastructure geared towards accessibility. The redistributive orientation depends on public network policies.	Public funding: 44/50 (88%); Synergy with municipal plans: 45/50 (90%)
Digital innovation	Digital technology is a selective enabling layer, not a generalised constitutive component. Digital services and monitoring show low frequencies.	Digital innovation: 16/50 (32%); Online maps: 8/50 (16%); Monitoring systems: 5/50 (10%); Wi-Fi: 5/50 (10%)
Enabling factors	Effectiveness depends on a combination of consensus-building processes, stakeholder arrangements and integrated services that make the space usable.	Co-design: 28/50 (56%); Community engagement: 26/50 (52%); workshops: 21/50 (42%); Designers involved: 35/50 (70%)
Main obstacles	Physical, regulatory and management constraints require compatibility of use, perceived safety, and routine maintenance.	Accessibility: 20/50 (40%); Safety / surveillance: 12/50 (24%); historical and archaeological protection: 9/50 (18%); Conflicts of use: 12/50 (24%); Vulnerable users: 15/50 (30%)

Tab. 4 | Summary table of the main findings from the benchmarking of 50 case studies (credit: the Authors, 2026).

General Fragility Index (GFI), which integrates demographic, social, and economic variables; the Climate Fragility Index (CFI), calculated through the 3-30-300[2] rule (Konijnendijk, 2023); and the Climate Shelter Index (CSI), which evaluates the capacity of urban green areas to function as climate shelters on the basis of biophysical characteristics and social accessibility (Maccabiani et alii, 2025).

The integration of the three indicators into the General and Climate Fragility Index (GCFI) makes it possible to read vulnerability and adaptive capacity simultaneously, guiding, in synergy with the other TALEA technologies, the strategic localisation of Green Cells as a new form of climate shelter. This integration aligns with the most up-to-date interpretations of green and blue infrastructures as complex systems of integrated management of natural resources in urban contexts (Valente et alii, 2024). The GFI and the GCFI operate at the territorial unit of the statistical areas of the Municipality of Bologna. For each area and for each of the three thematic components (demographic, social, and economic), the distribution of values across the whole territory is divided into quintiles, producing five categorical classes (low, medium-low, medium, medium-high, high fragility) numerically coded from 1 to 5. This quintilisation constitutes the normalisation phase, which makes the three components comparable on a common scale independently of the nature and unit of measurement of the original variables. The three components are then aggregated with differentiated weights. The greater weight assigned to the social component reflects an explicit methodological choice, consistent with the literature on urban fragility and with the orientation of SDG 10. The CFI is calculated at the same territorial unit (statistical areas) through the 3-30-300 rule using Sentinel-2 data (Google Earth Engine), DBSN, and OpenStreetMap. The CSI operates at a different territorial unit: individual accessible public green areas with a surface area greater than 0.5 ha and NDVI > 0.4.

Table 1 summarises, for each indicator, the territorial unit of calculation, the included components/variables, the normalisation procedure, the adopted weightings, and the aggregation formula, thus making the methodology fully replicable in other urban contexts. For a more in-depth discussion, reference is made to the text by Maccabiani et alii (2025), which explains the methodology in detail. The adopted methodological approach is consistent with the most recent developments in modelling and simulation tools supporting decision-making in the field of climate mitigation (Zarcone, Nava and Tucci, 2024).

Results and discussion of Phase 1 – The climate shelter as redistributive infrastructure: evidence from the literature | The critical review was developed starting from the main strands of the international literature on climate shelters, climate justice, and adaptive public spaces; the Ecosister project subsequently made it possible to deepen and contextualise this evidence through empirical applications at urban scale.

The structured critical literature review made it possible to reconstruct an articulated evolutionary trajectory of the concept of the climate shelter, identifying three distinct stages (Fig. 1). In the first, corresponding to the first European heatwave management programmes following the 2003 crisis, the shelter was conceived as an internalised, controlled and temporary space, based on high-energy-consumption technological solutions and placed within an eminently reactive and health-oriented perspective. The French Plan Canicule (Ministère de la Santé, 2004) represents its paradigmatic model: air-conditioned public buildings activated according to emergency protocols, intended to accommodate vulnerable populations during thermal peaks. The same logic has been adopted by numerous European cities, with networks of cooling centres included in Heat-Health Action Plans (World Health Organization Regional Office for Europe, 2008).

The second stage (the 2010s) marks the transition from an emergency logic to a proactive ap-

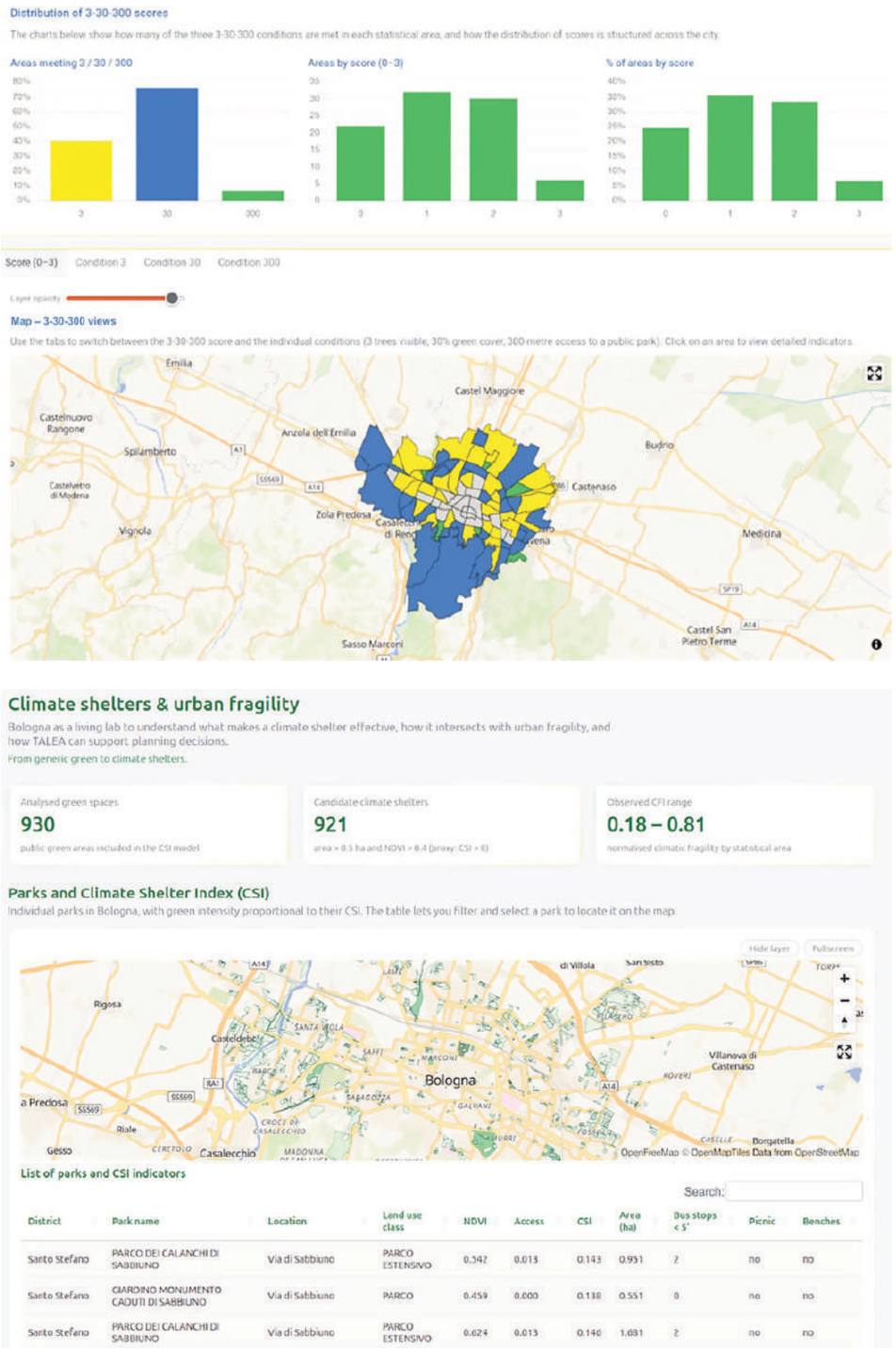


Fig. 7 | 3-30-300 index dashboard of the TALEA Platform (credit: TALEA project; platform development by project partner Fondazione Bruno Kessler, ref. M. Napolitano).

Fig. 8 | Bologna urban parks and related Climate Shelter Index (CSI): TALEA Platform (credit: TALEA project; platform development by project partner Fondazione Bruno Kessler, ref. M. Napolitano).

proach based on NbS: cities extend the concept beyond indoor spaces, including parks, school courtyards, tree-lined squares, porticoes and shaded areas. The most recent literature documents how the climate shelter is evolving from a place of protection into an infrastructure of urban well-being, capable of generating environmental and social value (Amorim-Maia et alii, 2023; Pede, 2024), configuring itself as a node in a network of ecosystem services that contributes to heat mitigation, equity in access to thermal comfort, and the quality of the urban experience (Bulkeley et alii, 2013). The heat-island effect and its relationship with urban morphological configurations are widely documented both in the literature and in field experiments (Magliocco and Oneto, 2023), as is the effectiveness of NbS micro-interventions in school and community contexts in improving local thermal comfort (Baró et alii, 2022; Tzortzi, Lux and Pardo Delgado, 2024; Sanz-Mas et alii, 2025).

The third stage identified in the review corresponds to the redefinition of the shelter as relational and redistributive infrastructure, in which systemic approaches based on water / energy / microclimate integration reinforce its interpretation as a metabolic infrastructure of urban care (Sposito and Mittersteiner, 2025).

Three key conceptual dimensions emerge from the literature review. The first is 'slow violence' (Nixon, 2011), cumulative and often invisible, which climate change exerts disproportionately on the most vulnerable populations, in relation to which climate shelters are configured as instruments for countering this form of structural injustice. The second is the relational shelter, a multispecies, accessible space that is sensitive to climatic and social thresholds, which operates as a critical infrastructure of urban care (Armondi et alii, 2022), supporting everyday life and incorporating logics of anticipation and preparedness (Haraway, 2016). The third is the Fourth Space proposed by Carta (2025), an emerging, hybrid and collaborative urban sphere in which the climate shelter becomes an urban micro-ecosystem where climatic comfort, social inclusion, and community activation intertwine.

A central result of the literature review concerns the link between the climate shelter and ecological gentrification. As highlighted by Beretta and Cucca (2019) and by a vast international literature on green gentrification (Bressane, Cunha Pinto and de Castro Medeiros, 2024), green infrastructures can produce exclusions if not accompanied by redistributive policies. The distribution of environmental resources always constitutes a form of power (Anguelovski, 2014; Secchi, 2013; Soja, 2010), and the evolution of the shelter from emergency infrastructure to well-being infrastructure implies the expansion of the right to comfort as an integral part of the right to the city (Harvey, 2008).

The body of literature on spatial justice and energy justice (Anguelovski, 2014; Soja, 2010) provide the interpretative framework within which to read the climate shelter as a redistributive device; the analyses developed within the Ecosister project (D4.2.3 – Accessibility as a prerequisite for inclusive design that aims at spatial justice, energy justice and citizen engagement; analysis of relevant case studies on sustainable and social innovation practice in urban and cultural spaces – Definition of a methodology for an interactive catalogue to activate a generative process) converge in defining the climate shelter as a device of environmental redistribution and a lever for guaranteeing basic conditions of liveability in the most exposed neighbourhoods, reducing inequalities in line with the principle of SDG 10. These dynamics confirm the urgency of interpreting climate justice as a component of broader spatial justice, in line with recent evidence on the relationship between urban models and equitable access to environmental resources (Fiorini et alii, 2025).

The teaching experiments confirm what has been discussed in the international literature on the role of situated learning and research-through-design as instruments of design anticipation (Armondi et alii, 2022). Within this framework, the activities developed in the context of Ecosister (D4.2.9 – Climate Shelters and Resilient Public Spaces: toward an Integrated Network of Adaptation in Consolidated Urban Districts. Spatial Devices for Ecological Transition and Urban Well-Being) provide further applied evidence.

The Advanced Design Laboratory at the University of Bologna developed design scenarios for Bologna through a multi-level reading of the territory, starting from the analysis of the historical evolution of the urban landscape and of its microclimatic variations applied to critical areas of the city. This approach helped to consolidate the theoretical framework, on the one hand by empirically verifying the strategic role of climate shelters, strengthening their design value and their link with the themes of spatial justice and inequality, and on the other by prefiguring the network of micro-ecosystems later systematised in the concept of the Green Cell. The shelter ultimately assumes an ecological value as a node of the urban ecological network, contributing to vegetative continuity, natural ventilation, heat-island mitigation, and the promotion of biodiversity.

Results and discussion of Phase 2 – Comparative performance evaluation: strategies, models and lessons learned | The comparative analysis conducted within the TALEA project evaluated 50 international case studies of NbS-based urban regeneration (Tab. 2), selected for relevance, scalability, and integration of the three dimensions of innovation (physical, technological, and social). The 50 case studies were catalogued (Fig. 2) and entered into a structured inventory in four information blocks: A (general information and framing); B (constraints and opportunities); C (design process, stakeholders, integrated services and results); D (applied Nature-based Solutions).

The comparative performance evaluation matrix made it possible to classify the projects according to the type of Green Cell (nodal, linear, diffused), the adopted NbS, the prevailing dimension of innovation and the potential as a climate shelter. The results highlight a significant correlation between type of intervention, urban context and redistributive potential, confirming that the most effective solutions for reducing climate inequalities are those that integrate physical transformation, social activation, and digital support within a systemic framework. Table 3 presents a selection of the case studies most relevant to the theme of climate shelters, highlighting the dimensions of innovation and the spatial configuration. The cases with the greatest potential as climate shelters among the 50 analysed were collected, selected by applying a second level of filtering to the performance matrix: pro-

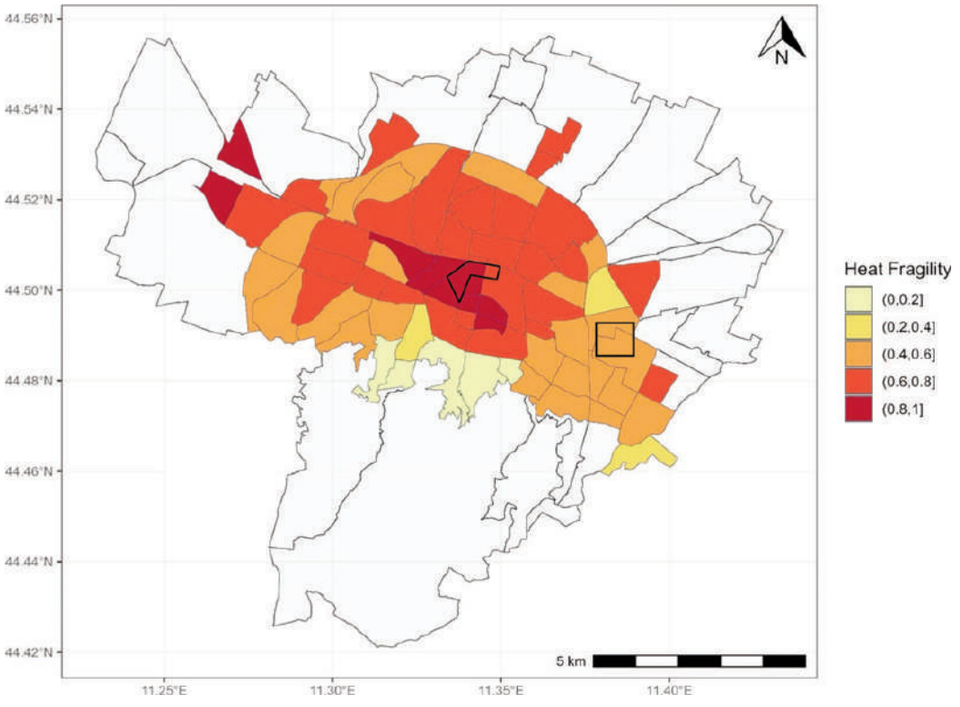
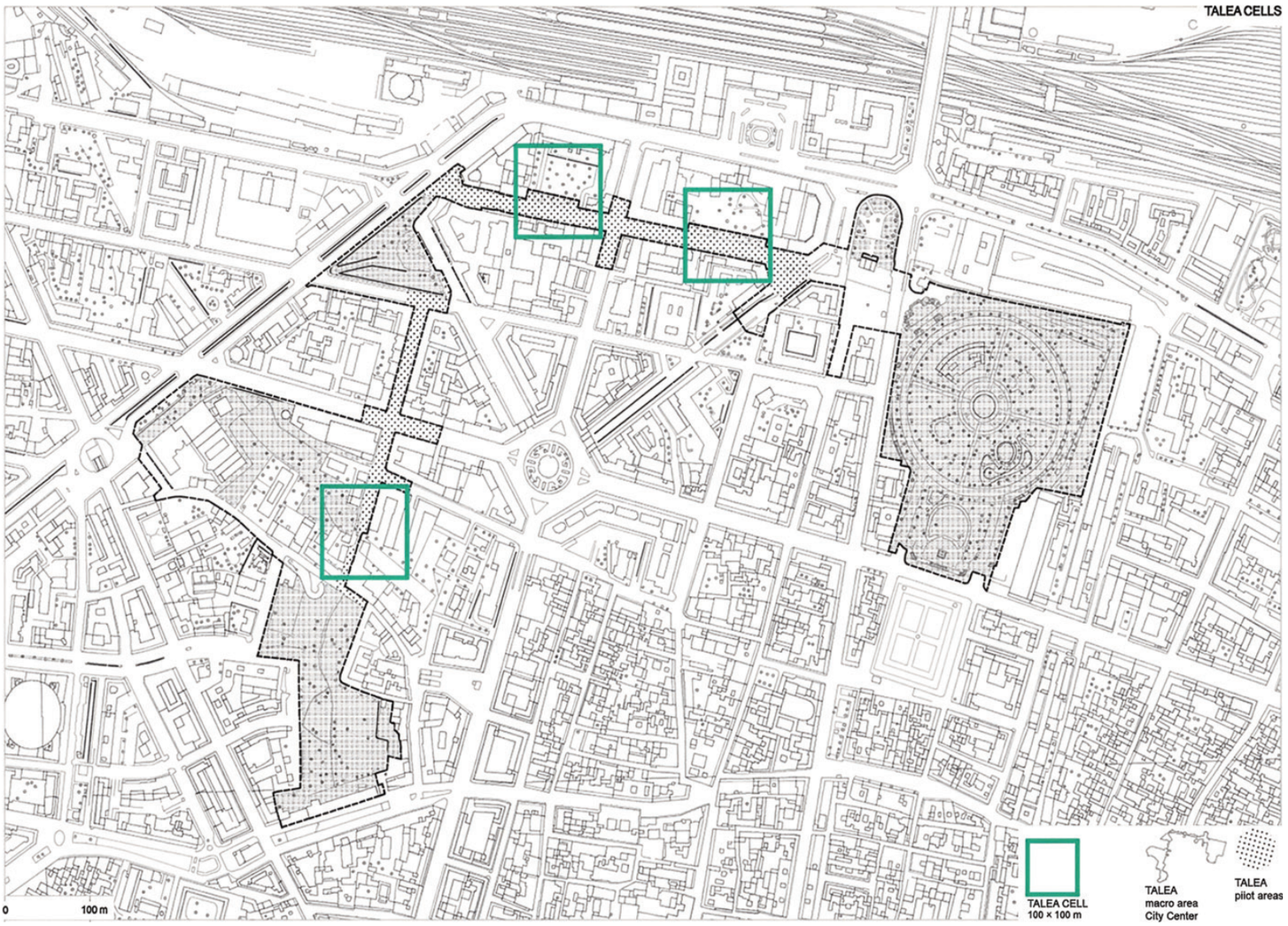


Fig. 9 | Map of Bologna showing the indicator of social vulnerability to extreme heat and identifying the pilot areas of the TALEA project in the historic centre (Marconi area) and in the Fossolo area (credit: Maccabiani et alii, 2025; adapted by the Authors, 2026).



jects combining a high score on the climate-shelter axis (presence of shaded areas, vegetation, accessibility, and free public use) with the activation of at least two of the three dimensions of innovation (physical, social, digital) were included. This discriminating criterion makes it possible to distinguish interventions of simple environmental quality from those expressing a systemic redistributive potential, preventing the selection from being arbitrary or purely illustrative.

The cross-cutting critical analysis reveals a structural tension common to all the typologies: the trade-off between localised impact and distributive impact. Nodal interventions, such as the regeneration of Plaça Sant Antoni in Barcelona (Figg. 3, 4), completed in 2019 with depaving, mature tree planting and shaded seating, generate punctual high-quality microclimatic oases, with documented reduction of the heat-island effect within a radius of about 100 m, active co-design processes and post-occupancy monitoring. Their structural limitation lies in scale insufficiency: without an equivalent network of nodes, the benefit remains circumscribed and risks translating into a 'premium amenity' for the immediately surrounding neighbourhood, fuelling the mechanisms of property revaluation documented in analogous contexts (Bressane, Cunha Pinto and de Castro Medeiros, 2024).

The case of Corte Don Bosco in Bari (2025) instead offers an opposite model: the neighbourhood scale and the modularity of the intervention (light, reversible and low-cost materials) maximise transferability in resource-limited contexts, reducing economic and regulatory barriers. The limitation is the lower thermal mitigation capacity compared with interventions with greater vegetative mass and permanence.

Linear interventions show greater redistributive potential thanks to ecological continuity, but present significant maintenance and governance criticalities. The Corredor Verde Passeig de Sant Joan in Barcelona (2016) represents a significant case: a combination of mature trees, shaded seating, reduction of vehicular lanes and ecological continuity with other nodes of the urban green network (Fig. 5). Linear scalability, that is, the same formula replicable on any street axis suitable for tree planting, is its main strength; the weakness is the long period of biological maturation and the high maintenance costs, which make it accessible mainly to Administrations with robust municipal budgets.

Les Berges du Rhône in Lyon (2008), although a case of major impact on the quality of riverside public space, presents a specific dependence on hydrogeological morphology, namely the presence of a large river, which drastically limits its transferability to urban contexts lacking significant watercourses. The diffused model is the most coherent with a redistributive logic, but also the most complex to govern. Barcelona's Climate Shelters Schools programme (López Plazas et alii, 2023; Sanz-Mas et alii, 2025; Baró et alii, 2022) is the most documented and replicable case: standardised interventions in 21 school courtyards with a protocol for public opening during heatwaves, temperature monitoring and measurable impact on community health. The strengths are the replicability of the protocol across different buildings, integration with the education system and universal accessibility. The limitations concern dependence on the school calendar (summer closure of buildings) and the need for stable institutional agreements between the Municipality and schools.

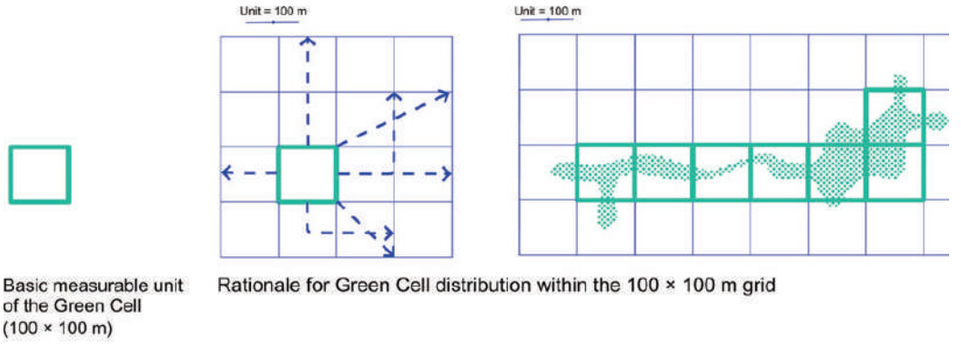
Medellín's Corredores Verdes (2016) represents the most advanced case of a diffused network at metropolitan scale:36 km of green axes, documented reduction of the heat-island effect by up to 3 °C, multi-level governance. However, transferability to the European context is partial: the model was developed under a condition of profound spatial injustice and required extraordinary public investment that is difficult to replicate without strong political will and dedicated resources.

The importance of school courtyards as microclimate shelters is also confirmed by recent developments highlighting the role of NbS in improving local thermo-hygrometric comfort (Tzortzi, Lux and

Previous page

Fig. 10 | Location of the three Green Cells in the historic centre of Bologna: 1) and 2) Via Cesare Boldrini; 3) Via del Porto (credit: TALEA project, 2025; ref. S. Orlandi).

Fig. 11 | Strategies for the application of TALEA Green Cells. The diagrams show the three typological configurations: linear on a mobility axis; nodal in a consolidated context; diffused in a mixed peripheral context (credit: TALEA project, 2023; ref. S. Orlandi).



Pardo Delgado, 2024). The cross-cutting comparison also makes it possible to formulate some critical lessons for the Bologna framework. Ecological quality does not guarantee redistributive equity: an explicit orientation towards the neighbourhoods with the greatest fragility is necessary, as operationalised through the GCFI. Furthermore, governance is the most critical and least replicable enabling factor: the most successful cases present stable and pre-existing participatory management structures, a condition that the TALEA model incorporates into the social dimension of innovation. Finally, reversibility and modularity of interventions increase transferability but reduce microclimatic performance. The compromise must be calibrated explicitly as a function of the context, urban density, and the extent of climate fragility.

From the analysis summarised in Table 4, four recurring strategies emerge with direct implications for the conception of the climate shelter as infrastructure of equity. The first is soil depaving and renaturalisation, adopted in projects such as the Corredor Verde (2016) in Barcelona (Fig. 6), Skanderbeg Square (2010) in Tirana, and Corte Don Bosco (2025) in Bari, where the removal of impermeable surfaces constitutes the first step for the creation of natural climate shelters. The second is the use of modular green furnishings and mobile structures, as in the CoolCo's project (2023) in Budapest, which offers highly flexible, immediately replicable plug-and-play solutions for creating temporary cooling areas during heatwaves.

The third is the integration of multifunctional green-blue infrastructures, exemplified by Watersquare Benthemplein (2013) in Rotterdam, where the square simultaneously performs recreational, water-retention, and thermal-comfort functions; the green-blue approach is consistent with the most recent readings that interpret urban cooling as an integrated metabolic process based on the relationships among water, energy and microclimate (Sposito and Mittersteiner, 2025). The fourth is the model of a diffused network of micro-interventions, which represents the approach most coherent with the vision of the shelter as redistributive infrastructure: Medellín's Corredores Verdes (2016), Barcelona's Climate Shelters Schools programme (2018-2030) and Amsterdam's SET Community Gardens (2014) demonstrate how capillary networks can extend climatic benefits also to the most marginal communities.

A cross-cutting result of particular relevance for SDG 10 concerns the risk of ecological gentrification. The analysis confirms that high-quality interventions localised in central areas and financed privately, such as Bosco Verticale (2014) in Milan, tend to benefit high-income populations, whereas the projects most effective in reducing inequalities are those operating at diffused scale in peripheral and vulnerable contexts, such as Medellín's Corredores Verdes (2016). This evidence reinforces the central thesis of the contribution: the climate shelter must be conceived as a capillary and accessible network, not as a punctual intervention of excellence. The comparative analysis also highlights that about half of the projects analysed integrate forms of digital innovation (GIS platforms, environmental sensors, citizen science), but none yet implements a complete digital twin. This finding confirms the position of the TALEA project as a frontier in the integration of the three dimensions of innovation: no analysed case simultaneously combines NbS, community co-design, and real-time digital monitoring within a replicable modular unit.

Among the key enabling factors are collaboration between Universities and local Administrations, the incremental pilot approach with reversible interventions, intersectoral governance, and the integration of NbS into long-term urban strategies. The main obstacles concern the limited availability of physical space in historic centres, the long-term maintenance of NbS, tensions between experimentation and the rigidity of institutional frameworks, and the risk of loss of community engagement in the medium and long term. These criticalities confirm what has also been observed in the literature on the co-design processes of public and welfare spaces, which highlights the need to structure stable forms of governance in order to guarantee continuity and maintenance over time (Campagnaro et alii, 2025).

Results and discussion of Phase 3 – The Bologna experimentation: from diagnosis to strategic localisation | Bologna constitutes the testing ground of the framework developed in the first two phases. Located in a climatic zone characterised by hot and humid summers, the city records a significant increase in heatwaves: compared with the period 1961-1990, the mean annual temperature is expected to rise from 13.9 to 15.6 °C in the 2020-2050 window, with heatwaves of 6 consecutive days and 42 summer tropical nights (data from the Emilia-Romagna Region Climate Observatory[3]). More than 50% of the municipal territory presents a poor hydrological response, and heatwaves are amplified by the heat-island effect, with relevant impacts especially in the neighbourhoods with the highest housing density.

The application of the GCFI framework to the Bologna territory produced significant results on

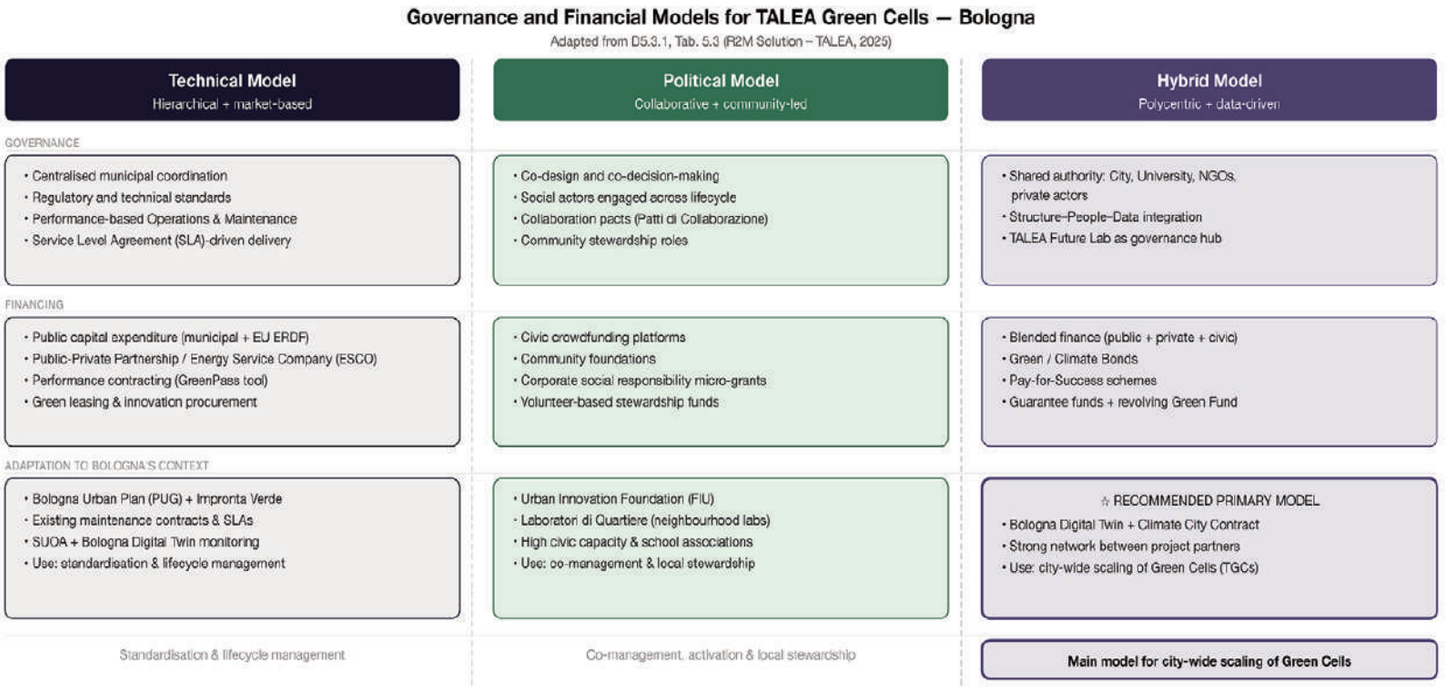


Fig. 12 | Governance and financial models for TALEA Green Cells in Bologna. Adapted by the authors from D5.3.1, Tab. 5.3 (R2M Solution – TALEA, 2025). Abbreviations: ERDF = European Regional Development Fund; FIU = Fondazione Innovazione Urbana (now Fondazione IU Rusconi Ghigi); PUG = Piano Urbanistico Generale (Bologna General Urban Plan); SLA = Service Level Agreement; SUOA = Systemic Urban Observation Atlas (TALEA digital monitoring platform); TGC = TALEA Green Cell (credit: the Authors, 2026).

the spatial distribution of vulnerabilities. The General Fragility Index (GFI), developed from the metropolitan fragility framework of the Municipality of Bologna[4], integrates three dimensions: demographic (percentage of residents over 80, population change rate, and natural balance), social (single-person households over 65, minors in single-parent households, young foreigners, foreign turnover, and graduates aged 25-49) and economic (average taxable income, taxpayers below 10,000 euros, and rented dwellings).

The three dimensions are aggregated and weighted in a synthetic indicator classifying statistical areas into five levels of fragility. The demographic component of the GFI, in particular the share of residents over eighty and the prevalence of elderly single-person households, expresses the fragility documented by recent literature on the relationship between population ageing, thermal stress and well-being in urban spaces (Chaza Chimeno, Revellini and Cellucci, 2024): census sections with high GFI coincide with the areas of greater exposure to heat risk and of lower autonomy in access to climate shelters. The Climate Fragility Index (CFI), calculated through the 3-30-300 rule, measures the quality of local green infrastructures according to three complementary criteria: visibility of at least 3 trees from every residence, minimum tree cover of 30% in the neighbourhood, access to a public green area within 300 metres (Fig. 7). The implementation used Sentinel-2 images processed in Google Earth Engine to derive tree-cover density, in combination with the geometries of public green areas (DBSN), and residential building footprints (OpenStreetMap). Areas satisfying fewer criteria are climatically more fragile.

Integration into the GCFI revealed how the inclusion of the climatic factor significantly modifies vulnerability patterns, especially in dense neighbourhoods with limited tree cover and low compliance with the 3-30-300 rule. Climatic criticalities are not distributed uniformly, but concentrate in consolidated areas of the city where environmental and social vulnerabilities overlap, generating situations of climate injustice.

The Climate Shelter Index (CSI), developed according to the methodology of Maccabiani et alii (2025), evaluated the capacity of public green areas to function as climate shelters. The index assigns each area a value between 0 and 1, calculated as a weighted combination of: surface area (areas > 0.5 ha), NDVI vegetation index (> 0.4), accessibility (pedestrian / cycling paths, bus stop within 5 minutes, and disabled parking), density of drinking fountains, benches, and rest areas (Fig. 8). The complete procedure for constructing the CSI (formula, weightings, eligibility criteria, and modality of spatial join with the GCFI layer) is illustrated in Table 1 of the Methodology section. Used jointly, GCFI and CSI form a two-scale analytical framework: the GCFI identifies where urban fragility is concentrated and the CSI identifies which specific spaces within fragile areas possess the potential to become climate shelters and how targeted interventions can strengthen their resilience function.

The pilot areas of the TALEA project, where Green Cells will be implemented, were selected by overlaying levels of climate fragility, sociodemographic vulnerability, urban ecological networks and citizens' proposals through the Bologna Participatory Budget[5]. They were located in the northern sector of the historic centre (Marconi area) and in the Fossolo neighbourhood (Figg. 9, 10). The implementation of Green Cells in these contexts, conceived as a new form of modular and replicable climate shelter, aims to create a spatial and ecological connection between the pilot areas and the municipal Impronta Verde[6] project, demonstrating how localised interventions can generate systemic impacts on microclimatic quality and spatial justice. The incremental logic, inspired by vegetative propagation by cuttings, allows each intervention to take root, grow and multiply, giving rise to an ever-expanding network of climate shelters.

At the functional and spatial levels, Green Cells can be declined in three typological configurations: nodal (a punctual intervention concentrated in squares, courtyards or widened spaces), linear (along street axes, pedestrian routes or cycle-path edges) and diffused (as a capillary network of coordinated micro-interventions at neighbourhood scale). The selection of NbS, in particular tree and shrub species, follows criteria of climate resilience and compatibility with the Bologna historic landscape context (particularly delicate in the historic centre), and is guided by microclimatic simulations that make it possible to analyse current comfort conditions, and prefigure the best strategies for improvement (Fig. 11).

Digital innovation, in particular the Systemic Urban Observation Atlas[7], transforms mapping from an interpretative tool into a transformative process, making it possible to assess in real time the distributive effects of interventions and to guide corrective actions in order to ensure that the benefits of Green Cells actually reach the most vulnerable communities. The design of Green Cells integrates verifiable Design for All criteria: physical accessibility compliant with EN 17210:2021[8], inclusive orientation systems, proximity to local public transport stops (within a 5-minute walk), parking spaces for users with reduced mobility, ergonomic seating, and drinking fountains. Governance provides for extended opening hours during heatwaves, scheduled routine maintenance and participatory management with resident communities, according to a model consistent with experiences of

local outposts and proximity care (Pollo, Biolchini and Scognamiglio, 2023; Setola and Borgianni, 2025).

The long-term sustainability of Green Cells requires hybrid governance models combining public institutional anchoring and structured community participation. The benchmarking conducted in TALEA deliverable 'D5.3.1 – Integrative Governance and Financial Guide for the Sustainability of Green Transition' (R2M Solution, 2025) on 23 European case studies demonstrates that hybrid configurations, integrating municipal coordination, multi-actor co-management and digital monitoring tools, are more effective in guaranteeing the durability and scalability of modular green infrastructures.

For the Bologna context, this translates into the formalisation of stewardship agreements and a RACI matrix (Responsible / Accountable / Consulted / Informed) for the distribution of maintenance responsibilities among the Municipality, project partners and resident communities; into the activation of the TALEA Future Lab as a permanent hub of participatory governance and civic training; into integration with the Bologna Digital Twin for the adaptive monitoring of the redistributive impacts of interventions, in line with the Climate City Contract and the Impronta Verde programme (Fig. 12).

Synergies and trade-offs with the SDGs | The contribution is primarily inscribed within SDG 10 (Reduce inequalities), interpreting the climate shelter as a device of environmental redistribution capable of counteracting asymmetries in exposure to thermal risk and in access to urban comfort. The strongest synergies are activated with SDG 3 (Health and well-being), since the mitigation of thermal stress directly affects the mortality of vulnerable populations, with SDG 11 (Sustainable cities), by configuring the shelter network as permanent infrastructure integrated into planning, and with SDG 13 (Climate action), by strengthening local adaptive capacity through NbS.

Relevant synergies are identified with SDG 9 (Innovation and infrastructure), due to the innovative character of the GCFI-CSI framework and digital integration, with SDG 15 (Life on land), for the contribution to biodiversity and ecological continuity, with SDG 4 (Education), for the role of school courtyards as climate shelters and environmental education spaces (Barcelona, Paris), and with SDG 6 (Water), through green-blue infrastructures.

Indirect synergies can be traced in SDGs 1, 5, 4, 6, 7, and 17. The reduction of health costs associated with thermal stress lightens the burden of poverty on the most vulnerable families (SDG 1). Extreme heat affects women in differentiated ways, and thermally comfortable and safe public spaces contribute to reducing this gender asymmetry (SDG 5). The role of school courtyards as climate shelters and environmental education spaces feed ecological literacy (SDG 4). The reduction of mechanical cooling demand lowers energy consumption (SDG 7). Multi-level governance among Universities, Administrations and communities constitutes the institutional prerequisite of the model (SDG 17).

The trade-offs concern SDG 8, due to tensions between the valorisation of spaces and ecological gentrification, and SDG 12, due to the resources necessary for the maintenance of NbS. Weak or non-pertinent relationships occur with SDGs 2, 14, and 16: the relationship with SDG 2 is marginal. Green Cells may include community gardens, but food production is not a central objective of the framework and the contribution to food security is negligible at the intervention scale considered. The relationship with SDG 14 (Life below water) is very weak: green-blue infrastructures reduce the input of pollutants into surface watercourses, but marine and coastal ecosystems are not significantly affected. The relationship with SDG 16 (Peace, justice and institutions) is present as an institutional background (participatory processes and multi-level governance are explicit components of the model) but does not constitute a primary axis of innovation of the contribution. See the summary table (Tab. 5).

Conclusions, limits, and transferability | The research pathway has highlighted how the climate

SDG no.	SDG name	Relationship	Notes
10	Reduced Inequalities	Direct synergy (primary)	Primary anchor of the contribution
3	Good Health and Well-being	Direct synergy	Reduces heat-related morbidity and mortality
11	Sustainable Cities and Communities	Direct synergy	Green Cells as permanent adaptive infrastructure
13	Climate Action	Direct synergy	NbS enhance local adaptive capacity
1	No Poverty	Indirect synergy	Reduces health costs for the most vulnerable
5	Gender Equality	Indirect synergy	Addresses asymmetric heat exposure for women
4	Quality Education	Indirect synergy	Schoolyard shelters foster ecological literacy
6	Clean Water and Sanitation	Indirect synergy	Green-blue NbS reduce runoff and improve water management
7	Affordable and Clean Energy	Indirect synergy	Natural cooling reduces mechanical air-conditioning demand
9	Industry, Innovation, and Infrastructure	Indirect synergy	GCFI–CSI framework as a replicable digital infrastructure
15	Life on Land	Indirect synergy	Contributes to urban biodiversity and ecological continuity
17	Partnerships for the Goals	Indirect synergy	Multi-level governance among Universities, municipalities, and communities
8	Decent Work and Economic Growth	Trade-off	Risk of ecological gentrification – mitigable via GCFI-guided siting
12	Responsible Consumption and Production	Trade-off	NbS maintenance requires resources – mitigable via community management
2	Zero Hunger	Weak / non-pertinent	Community gardens marginal to core objectives
14	Life Below Water	Weak / non-pertinent	Marine and coastal ecosystems are not significantly affected
16	Peace, Justice, and Strong Institutions	Weak / non-pertinent	Participatory governance is an enabling condition, but not a primary axis of innovation

Tab. 5 | Table summarising the contribution of the research to the individual SDGs, highlighting direct synergies, indirect synergies, trade-offs, and weak or non-pertinent relationships (credit: the Authors, 2026).

shelter can represent a complex urban device, capable of integrating ecological, social, and spatial dimensions in the reduction of inequalities. Its conceptual evolution, from a closed and refrigerated space to a diffused infrastructure of microclimatic well-being, reflects a transformation in the way cities can respond to the impacts of climate change, promoting more equitable and resilient forms of urban life. The Bologna experimentations, conducted through the convergence of the Ecosister and TALEA projects, help to demonstrate how the integration of quantitative and qualitative indicators, advanced digital tools, and co-design methodologies can guide the strategic localisation of climate shelters, also in delicate and constrained contexts such as the historic centre.

The Green Cells model offers a scalable and replicable operational solution, aimed at repairing the discontinuities of green infrastructures and generating widespread effects of mitigation and regeneration. As argued by Macaluso and Palma (2025) with reference to vegetative infrastructures as design devices for health and equality, thermal comfort and access to ecosystem benefits are matters of redistribution before being matters of environmental mitigation: the accessible climate shelter is therefore a prerequisite of the right to health and urban liveability, not an additional service for those who already have the possibility to access it.

The research, which the TALEA project makes it possible to translate at the operational level, suggests that the systemic network approach, by integrating physical, digital, and social dimensions, makes it possible to counter phenomena of ecological gentrification and to ensure that the benefits of the green transition do not translate into new forms of exclusion, in coherence with the principle of 'leaving no one behind' promoted by the 2030 Agenda (UN, 2015). In this perspective, a particularly significant synergy emerges with the project Linee d'Ombra – Climatic Itineraries under the Porticoes[9], approved by the Bologna City Council in February 2026 and co-financed by the Ministry of Culture.

The project interprets the 62 kilometres of Bologna porticoes, a UNESCO World Heritage Site, as a shaded network connecting urban climate shelters, updating, in terms of climate adaptation, the concept historically associated with such infrastructures. The complementarity between TALEA's Green Cells, which operate on the nodes of the climatic network, and Linee d'Ombra, which intervenes on linear connections through the porticoes, prefigures an integrated model in which punctual shelters and climatic corridors are rooted in the historic heritage of the city.

Among the limits of the research are the still initial character of the TALEA experimentations, launched in December 2024, which does not yet provide post-implementation data on thermal mitigation effects, the dependence of the indicators on the resolution and availability of geospatial data, and the absence of external validation in contexts other than Bologna. The main barriers to the dissemination of the approach instead include cultural resistance to change in consolidated urban-planning practices, the rigidity of regulatory frameworks towards experimentation in public space, particularly in listed historic centres, and the risk of loss of involvement of the local community in the medium and long term, which requires stable participatory governance structures.

In terms of transferability, the TALEA framework and the Green Cells model are conceived to be adapted to different contexts, provided that comparable geospatial and socio-demographic data are available. The very nature of the European Urban Initiatives, of which TALEA forms part as a winning project of the Greening Cities call, provides that the methodology and the experimented solutions should have a high degree of transferability. For this reason, future developments envisage their application to the transfer cities (Marseille, Riga, Cluj-Napoca), with the necessary adaptation to the different climatic, institutional, and socio-cultural context.

The crucial question of the sustainability of the network model in the long term remains open: the 'right to comfort' as an urban right requires structural commitments of maintenance and governance that transcend the life cycle of individual research projects, raising the need for an institutional embeddedness of the experimented practices.

Acknowledgements

The contribution is the result of a common reflection by the Authors. However, the introductory paragraph is attributable to R. Roversi and R. Mercuri; the 'Methodology' to R. Roversi and B. Turillazzi; the 'Results and discussion of Phase 1 – The climate shelter as redistributive infrastructure: evidence from the literature' to R. Mercuri and D. Longo; the 'Results and discussion of Phase 2 – Comparative performance evaluation: strategies, models and lessons learned' to B. Turillazzi, D. Longo and R. Roversi; the 'Results and discussion of Phase 3 – The Bologna experimentation: from diagnosis to strategic localisation' to R. Roversi and D. Longo; 'Synergies and trade-offs with the SDGs' to R. Mercuri and B. Turillazzi; and the 'Conclusions' to R. Roversi and D. Longo.

The research was developed within the framework of the PNRR project 'Ecosister – Territorial Innovation Ecosystem of Emilia-Romagna' (ECS_00000033), funded by PNRR MUR M4C2-I1.5, running from October 2022 to February 2026, and of the European project 'TALEA – Green Cells Leading the Green Transition' (EUI02-064), funded by the European Urban Initiative, launched in December 2024, with a duration of 48 months and currently ongoing.

The Authors acknowledge the contribution of the TALEA consortium to the development of the project proposal and to the current first phase of implementation, in particular the work of FBK. In addition, the Authors thank the members of the TRACE research team of the Department of Architecture of the University of Bologna, who are not among the authors of the paper but are involved in the TALEA[10] project, in particular A. Boeri, S. O. Murielle Boulanger, M. Massari, S. Orlandi, M. Recalcati, G. Rizzoli, L. Brunello, and D. Sala.

Notes

1) For further information, please consult the webpage: fbk.eu/it/ [Accessed 28 March 2026].

2) The 3-30-300 rule (Konijnendijk, 2023) provides for the visibility of at least 3 trees from every residence, a minimum tree cover of 30% in the neighbourhood, and access to a public green area within 300 metres.

3) For further information, please consult the webpage: arpae.it/it/temi-ambientali/clima/dati-e-indicatori [Accessed 28 March 2026].

4) The Fragility Map is a study conducted by the Municipality of Bologna to map conditions of fragility and marginalisation of various kinds within its administrative territory and to propose policies aimed at addressing them. For further information, please consult the webpage: comune.bologna.it/pianoinnovazioneurbana/mappadellafragilita/ [Accessed 28 March 2026].

5) For further information, please consult the webpage: partecipa.comune.bologna.it/partecipa/bilancio-partecipativo [Accessed 28 March 2026].

6) The Municipality of Bologna's Impronta Verde project provides for the strengthening of ecological corridors and green-blue connections at territorial scale. For further information, please consult the webpage: crescebologna.it/progetti/impronta-verde-e-neutralita-climatica [Accessed 28 March 2026].

7) For further information, see: talea.comune.bologna.it/#gallery [Accessed 28 March 2026].

8) In Italy, the standard has been adopted as UNI CEI EN 17210:2021 – Accessibility and Usability of the Built Environment – Functional Requirements. The reference in the text to the European designation EN 17210 alone refers to the same standard in its original CEN formulation. For further information, please consult the webpage: tore.uni.com/en/uni-en-17210-2021 [Accessed 28 March 2026].

9) For further information on the Linee d'Ombra project, please consult the webpage: comune.bologna.it/novita/comunicati-stampa/linee-dombra-itinerari-climatici-sotto-i-portici-approvato-giunta-il-progetto-che-guarda-ai-portici [Accessed 28 March 2026].

10) For further information on the TALEA project, please consult the webpage: da.unibo.it/it/ricerca/progetti-di-ricerca/progetti-in-ambito-internazionale/talea [Accessed 28 March 2026].

References

Amorim-Maia, A., Anguelovski, I., Connolly, J. and Chu, E. (2023), "Seeking refuge? – The potential of urban climate shelters to address intersecting vulnerabilities", in

Landscape and Urban Planning, vol. 238, article 104836, pp. 1-12. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.landurbplan.2023.104 836 [Accessed 28 March 2026].

Anguelovski, I. (2014), *Neighborhood as Refuge – Community Reconstruction, Place Remaking, and Environmental Justice in the City*, MIT Press, Cambridge. [Online] Available at: doi.org/10.7551/mitpress/9780262026925.001.0001 [Accessed 28 March 2026].

Armondi, S., Balducci, A., Bovo, M. and Galimberti, B. (eds) (2022), *Cities learning from pandemic – Towards preparedness*, Routledge, London. [Online] Available at: doi.org/10.4324/9781003240983 [Accessed 28 March 2026].

Baró, F., Camacho, D. A., Pérez del Pulgar, C., Ruiz-Mallén, I. and García-Serrano, P. (2022), "Nature-Based Climate Solutions in European Schools – A pioneering Co-designed Strategy Towards Urban Resilience", in Ruiz-Mallén, I., March, H. and Satorras, M. (eds), *Urban Resilience to the Climate Emergency – Unravelling the transformative potential of institutional and grassroots initiatives*, Springer, Cham, pp. 125-146. [Online] Available at: doi.org/10.1007/978-3-031-07301-4_6 [Accessed 28 March 2026].

Beretta, I. and Cucca, R. (2019), "Ecological gentrification – A European perspective – Introduction", in *Sociologia Urbana e Rurale*, vol. 119, pp. 7-10. [Online] Available at: doi.org/10.3280/SUR2019-119001 [Accessed 28 March 2026].

Berretta, T., Desideri, F. and Staltari, M. (2024), "Il progetto dello spazio pubblico, tra complessità e crisi ecologica – Da sfida a opportunità per la rigenerazione urbana | Public space project, between complexity and ecological crisis – From challenge to opportunity for urban regeneration", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 16, pp. 74-87. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/1662024 [Accessed 28 March 2026].

Bressane, A., da Cunha Pinto, J. P. and de Castro Medeiros, L. C. (2024), "Countering the effects of urban green gentrification through nature-based solutions – A scoping review", in *Nature-Based Solutions*, vol. 5, article 100131, pp. 1-7. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.nbsj.2024.10 0131 [Accessed 28 March 2026].

Bulkeley, H, Carmin, J., Broto, V. C., Edwards, G. A. S. and Fuller, S. (2013), "Climate justice and global cities – Mapping the emerging discourses", in *Global Environmental Change*, vol. 23, issue 5, pp. 914-925. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2013.05.010 [Accessed 28 March 2026].

Campagnaro, C., Ronsivalle, D., Di Prima, N., Curtabbi, G. and Passaro, R. (2025), "Fare e rifare – Opportunità e limiti della co-progettazione per gli spazi pubblici e di welfare | Doing and redoing – Opportunities and limits of co-design for public and welfare spaces", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 17, pp. 310-323. [Online] Available at: doi.org/10.69143/2464-9309/17212025 [Accessed 28 March 2026].

Carta, M. (2025), *Sette lezioni di rigenerazione urbana*, LetteraVentidue, Siracusa.

Chaza Chimeno, M. R., Revellini, R. and Cellucci, C. (2024), "Invecchiamento della popolazione e spazi urbani – Nuove sfide digitali per il benessere degli anziani | Ageing population and urban spaces – New digital challenges for elderly well-being", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 16, pp. 98-107. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/1682024 [Accessed 28 March 2026].

Fiorini, L., Saganeiti, L., Perazzini, M., Bontempo, D., Bucci, M., Giancola, M. and Perilli, E. (2025), "L'impatto dei modelli urbani sul supporto sociale – Tra giustizia spaziale e sviluppo sostenibile | The impact of urban models on social support – Between spatial justice and sustainable development", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 17, pp. 196-207. [Online] Available at: doi.org/10.69143/2464-9309/17132025 [Accessed 28 March 2026].

Haraway, D. J. (2016), *Staying with the trouble – Making kin in the Chthulucene*, Duke University Press, London. [Online] Available at: doi.org/10.1215/9780822373780 [Accessed 28 March 2026].

Harvey, D. (2008), "The right to the city", in *New Left Review*, vol. 53, pp. 23-40. [Online] Available at: doi.org/10.64590/fmh [Accessed 28 March 2026].

IPCC (2023), *Climate Change 2022 – Impacts, Adaptation and Vulnerability – Working Group II Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge. [Online] Available at: doi.org/10.1017/978100932 5844 [Accessed 28 March 2026].

Konijnendijk, C. C. (2023), "Evidence-based guidelines for greener, healthier, more resilient neighbourhoods – Introducing the 3-30-300 rule", in *Journal of Forestry Research,* vol. 34, issue 3, pp. 821-830. [Online] Available at: doi.org/10.1007/s11676-022-01523-z [Accessed 28 March 2026].

López Plazas, F., Crespo Sánchez, E., Llorca Pérez, R. and Santacana Albanilla, E. (2023), "Schools as climate shelters – Design, implementation and monitoring methodology based on the Barcelona experience", in *Journal of Cleaner Production*, vol. 432, article 139588, pp. 1-20. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.139588 [Accessed 28 March 2026].

Macaluso, L. and Palma, A. (2025), "Foreste abitate – Architettura per la salute, il benessere e l'uguaglianza | Inhabited forests – Architecture for health, well-being, and equality", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 17, pp. 180-195. [Online] Available at: doi.org/10.69143/2464-9309/17122025 [Accessed 28 March 2026].

Maccabiani, E., Usmani, M., Nanni, R. and Napolitano, M. (2025), "Investigating Social Vulnerability to Extreme Heat – Heat Islands and climate shelters – The Case of Bologna", in *ISPRS | International Journal of Geo-Information*, vol. 14, issue 1, article 17, pp. 1-17. [Online] Available at: doi.org/10.3390/ijgi14010017 [Accessed 28 March 2026].

Magliocco, A. and Oneto, G. (2023), "Configurazioni spaziali nell'analisi ambientale urbana – Il contributo dell'isola di calore | Spatial configurations in urban environmental analysis – The role of the heat island effect", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 14, pp. 216-223. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/14182023 [Accessed 28 March 2026].

Ministère de la Santé et de la protection sociale, Ministère délégué aux personnes agées and Ministère de l'intérieur, de la sécurité intérieure et des libertés locales (2004), *Circulaire n° 2004-219 du 12 mai 2004 définissant les actions à mettre en oeuvre au niveau local pour détecter, prévenir et lutter contre les conséquences sanitaires d'une canicule.* [Online] Available at: sante.gouv.fr/fichiers/bo/2004/04-44/a0442935.htm [Accessed 28 March 2026].

Mitchell, D. (2003), *The Right to the City – Social Justice and the Fight for Public Space*, Guilford Press, New York.

Nazish, A., Abbas, K. and Sattar, E. (2024), "Health Impact of Urban Green Spaces – A Systematic Review of Heat-Related Morbidity and Mortality", in *BMJ Open*, vol. 14, article e081632, pp. 1-8. [Online] Available at: doi.org/10.1136/bmjopen-2023-081632 [Accessed 28 March 2026]

Nixon, R. (2011), *Slow Violence and the Environmentalism of the Poor*, Harvard University Press, Cambridge (MA). [Online] Available at: doi.org/10.2307/j.ctt2jbsgw [Accessed 28 March 2026]

Pede, E. C. (2024), "Heat waves and urban vulnerability – Climate shelters, public services and innovative solutions – Lessons from Barcelona", in *Urban Research & Practice*, vol. 17, issue 3, pp. 465-471. [Online] Available at: doi.org/10.1080/17535069.2024.2329058 [Accessed 28 March 2026].

Pollo, R., Biolchini, E. and Scognamiglio, V. (2023), "Progettare le Case della Comunità – Applicazione dell'approccio modulare a un modello innovativo di presidio | Designing Community Houses – Application of the modular approach to an innovative model of facility", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 14, pp. 224-235. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/14192023 [Accessed 28 March 2026].

Roversi, R. and Longo, D. (2025), "Regenerative and connective green Cells to address fragmentation and climate change in cities – The TALEA project integrated solution", in *Sustainability*, vol. 17, issue 7, article 3175, pp. 1-25. [Online] Available at: doi.org/10.3390/su17073175 [Accessed 28 March 2026].

Sanz-Mas, M., Continente, X., Marí-Dell'Olmo, M. and López, M. J. (2025), "Community Use and Perceptions of Climate Shelters in Schoolyards in Barcelona", in *International Journal of Public Health*, vol. 70, article 1608083, pp. 1-10. [Online] Available at: doi.org/10.3389/ijph.2025.16 08083 [Accessed 28 March 2026].

Secchi, B. (2013), *La città dei ricchi e la città dei poveri*, Laterza, Milano.

Setola, N. and Borgianni, S. (2025), "Promuovere salute e benessere – Strumenti per il progetto di Case della Comunità e quartieri sani | Promoting health and well-being – Tools for designing community health centres and healthy neighbourhoods", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 17, pp. 226-241. [Online] Available at: doi.org/10.69143/2464-9309/17152025 [Accessed 28 March 2026].

Soja, E. W. (2010), *Seeking spatial justice*, University of Minnesota Press, Minneapolis. [Online] Available at: doi.org/10.5749/minnesota/9780816666676.001.0001 [Accessed 28 March 2026].

Sposito, C. and Mittersteiner, G. (2025), "Riciclo idrico e raffrescamento urbano – Un nuovo paradigma metabolico Acqua / Energia / Cibo per le città temperate | Water recycling and urban cooling – A new Water / Energy / Food metabolic paradigm for temperate cities", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 18, pp. 22-71. [Online] Available at: doi.org/10.69143/2464-9309/1812025 [Accessed 28 March 2026].

Tucci, F., Altamura, P. and Pani, M. M. (2023), "Modulare le dinamiche urbane in chiave climatica – Spazi intermedi e neutralità climatica | Modulating urban dynamics from a climate perspective – In-between spaces and climate neutrality", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 14, pp. 204-215. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/14172023 [Accessed 28 March 2026].

Tzortzi, J. N., Lux, M. S. and Pardo Delgado, N. (2024), "Infrastrutture verdi urbane in America Latina – Una strategia per i cortili di Bogotà | Urban Green Infrastructure in Latin America – A strategy for Bogota courtyards", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 15, pp. 216-227. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/15172024 [Accessed 28 March 2026].

UN – United Nations (2015), *Transforming Our World – The 2030 Agenda for Sustainable Development.* [Online] Available at: sdgs.un.org/2030agenda [Accessed 28 March 2026].

Valente, R., Mozingo, L. A., Bosco, R. and Giacobbe, S. (2024), "Gestione integrata delle risorse naturali in contesti urbani sostenibili | Integrated natural resource management in sustainable urban context", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 15, pp. 180-189. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/1 5142024 [Accessed 28 March 2026].

World Health Organization Regional Office for Europe (2008), *Heat-Health Action Plans – Guidance*, World Health Organization Regional Office for Europe, Copenhagen. [Online] Available at: who.int/europe/publications/i/item/9789 289071918 [Accessed 28 March 2026].

Zarcone, R., Nava, F. and Tucci, F. (2024), "Mitigazione del clima e comfort umano – Uno strumento per la modellazione e simulazione di supporto alle decisioni | Climate mitigation and human comfort – A decision-support modeling and simulation tool", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 15, pp. 228-237. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/15182024 [Accessed 28 March 2026].

ARCHITECTURE
Research & Experimentation

AGATHÓN – International Journal of Architecture, Art and Design | n. 19 | 2026 | pp. 192-211
ISSN print: 2464-9309 – ISSN online: 2532-683X | doi.org/10.69143/2464-9309/19112026

Article Info

Received 11 March 2026
Revised 13 April 2026
Accepted 14 April 2026
Published 30 June 2026

ECOSISTEMI SOCIO-CIRCOLARI
Innovazione sociale, strategie circolari e ambiente costruito

SOCIO-CIRCULAR ECOSYSTEMS
Social innovation, circular strategies, and the built environment

Cinzia Talamo, Noelia Huanca Coacalla, Nazly Atta, Giancarlo Paganin

Abstract

Sebbene le metriche ambientali ed economiche della circolarità siano consolidate, la sua dimensione sociale resta poco sistematizzata. Le politiche europee riconoscono il ruolo della transizione circolare nei processi di inclusione, equità e benessere ma in letteratura il valore sociale della circolarità è spesso ricondotto ad ambiti come edilizia sociale, co-progettazione e imprese sociali. Il paper propone il concetto di Ecosistema Socio-Circolare (SCE), inteso come sistema spaziale e relazionale in cui attori a diverse scale condividono e cogestiscono risorse tangibili e intangibili. Applicato a casi europei il quadro interpretativo consente di riconoscere configurazioni organizzative e spaziali degli SCE, attivare processi circolari, generare valore sociale e sviluppare nuovi modelli abitativi e insediativi.

Although the environmental and economic metrics of circularity are well established, its social dimension remains insufficiently systematised. European policies recognise the role of the circular transition in processes of inclusion, equity, and well-being, yet in the literature the social value of circularity is often addressed within fields such as social housing, co-design, and social enterprise. The paper proposes the concept of the Socio-Circular Ecosystem (SCE), understood as a spatial and relational system in which actors operating at different scales share and jointly manage tangible and intangible resources. Applied to European cases, this interpretative framework enables the identification of organisational and spatial configurations of SCEs and their capacity to activate circular processes, generate social value, and develop new housing and settlement models.

Keywords

economia circolare, condivisione delle risorse, valore sociale, ecosistema socio-circolare, modelli abitativi e insediativi

circular economy, resource sharing, social value, socio-circular ecosystem, housing and settlement models

Cinzia Maria Luisa Talamo, PhD, is a Full Professor at the DABC, Politecnico di Milano (Italy). Her research interests include building maintenance, facility management, ICT applications for building management, circular economy, and industrial symbiosis. E-mail: cinzia.talamo@ polimi.it

Noelia Huanca Coacalla is a PhD Candidate at the DABC, Politecnico di Milano (Italy). Her research interests include circular economy and social value of circularity in the built environment, circular design across scales, and emerging perspectives on socio-circular ecosystems. E-mail: noeliamelany.huanca@polimi.it

Nazly Atta, PhD, is a Researcher at the DABC, Politecnico di Milano (Italy). Her research interests include digital and ecological transition, circular economy, ICT applications for circularity and sustainability in building design and management processes, facility management, and building maintenance. E-mail: nazly.atta@polimi.it

Giancarlo Paganin, PhD, is an Associate Professor at the DAStU, Politecnico di Milano (Italy). His research interests include circular economy and environmental sustainability, process management in the construction sector, risk management, and building management. E-mail: giancarlo.paganin@polimi.it

Nell'ambito dell'ambiente costruito l'economia circolare è passata dall'essere intesa come insieme di strategie ambientali focalizzate sull'ottimizzazione delle risorse[1] a una visione più ampia che include anche aspetti legati al progetto di architettura, alla rigenerazione urbana (Semprebon et alii, 2021) e allo sviluppo territoriale, come si evince, ad esempio, nelle proposte contenute nell'iniziativa del New European Bauhaus (Gkatzogias, Romano and Negro, 2024). Mentre le più consolidate interpretazioni delle strategie circolari riguardano principalmente la scala 'nano' (ciclo dei materiali e riduzione dei rifiuti), più recentemente il tema della circolarità si è allargato alle scale micro (edifici), meso (quartieri, distretti e reti) e macro (città e regioni), come evidenziato da Khadim et alii (2022).

Esperienze quali quelle dell'housing cooperativo per la rigenerazione rurale (Eixerés Ros, 2025), dei distretti energetici collaborativi (Crippa et alii, 2024), degli spazi di welfare co-progettati (Campagnaro et alii, 2025; Arquilla and Caruso, 2025), delle infrastrutture di servizio per il riuso e il riciclo (Olivastri and Tagliasco, 2024), delle micro-reti locali operanti in vari ambiti della transizione verde (Gaddi and Mastrolonardo, 2024) e dei materiali pro-sociali sviluppati attraverso micro-filiere locali inclusive (Del Curto, Valassina and Santi, 2025) dimostrano come le strategie circolari sempre più coinvolgano alle diverse scale modelli di governance partecipativi, infrastrutture collettive e co-progettazione.

Questa evoluzione nell'implementazione delle strategie circolari suggerisce un cambiamento di prospettiva, da edifici circolari isolati a interventi a scala più ampia, in cui le dimensioni insediative, sociali, organizzative ed economiche interagiscono sinergicamente. Su scala più ampia le dinamiche sociali generate dalle iniziative circolari rivelano un elevato grado di complessità e aprono a modelli abitativi e insediativi sperimentali, oltre che a nuove modalità collaborative di abitare e lavorare e a nuove relazioni a livello dei territori. Di conseguenza spostando l'attenzione sulle scale meso e macro, le sinergie tra le dimensioni tecniche, ambientali e sociali[2] richiedono l'adozione di originali chiavi interpretative.

Partendo da queste premesse e sulla base di un'analisi di progetti europei 'circolari' e orientati alla sperimentazione sociale il presente articolo propone il concetto di Ecosistema Socio-Circolare che deriva e amplia il concetto di 'cosistema circolare'. L'ipotesi alla base è che le strategie circolari implementate nell'ambiente costruito possano generare valore sociale all'interno dei sistemi relazionali e spaziali (ecosistema socio-circolare), in cui gli stakeholder condividono e co-gestiscono risorse tangibili e intangibili. In questo senso l'Ecosistema Socio-Circolare si pone come schema interpretativo, teso a incorporare le dimensioni tangibili (tecniche) e intangibili (sociali) della circolarità nell'indagine sulle implicazioni ambientali, tecniche e sociali nel breve e nel lungo termine, alle varie scale, dalla micro alla meso. In particolare assumere la prospettiva della 'meso-scala' consente di indagare i progetti circolari da diverse angolazioni, collocandoli in una visione sistemica che comprende: 1) l'organizzazione e la gestione di risorse condivise; 2) i ruoli degli stakeholder e i modelli relazionali; 3) le condizioni in cui la governance e i modelli di impresa basati sulla comunità supportano la generazione di valore a lungo termine. Il contributo ha dunque l'obiettivo di proporre il concetto di Ecosistema Socio-Circolare quale innovativo schema interpretativo, utile a leggere congiuntamente la circolarità, l'innovazione sociale, la governance e la condivisione delle risorse nell'ambiente costruito. Adottando un approccio olistico e superando la visione parziale del già noto concetto di Ecosistema Circolare il paper contribuisce a colmare una lacuna interpretativa emersa dalla letteratura.

In particolare nella prima sezione il paper delinea lo stato dell'arte in tema di Ecosistemi Circolari, sottolineando le principali lacune della letteratura legate alla dimensione sociale della circolarità. La seconda sezione introduce il concetto innovativo di Ecosistema Socio-Circolare (SCE), inteso come sistema spaziale e relazionale basato su strategie di condivisione e integrazione di molteplici categorie di risorse tangibili (spazi e materiali) e intangibili (informazioni, servizi ed energia). Nella terza sezione, a partire dal concetto di SCE, si propone uno schema interpretativo utile a definire, nell'ambito degli ecosistemi circolari, i diversi possibili approcci (chiuso, ibrido e aperto) alla gestione delle risorse, mettendo in luce le tipologie di relazione tra aspetti di circolarità e innovazione sociale. Nella quarta sezione lo schema interpretativo è applicato a un campione di casi di SCE selezionati a livello europeo, con l'obiettivo di testarne l'efficacia nell'individuare strategie di circolarità basate sulla condivisione delle risorse e in grado di promuovere l'innovazione sociale. Il fine è definire, a diverse scale, condizioni e modalità di sviluppo e di crescita di modelli abitativi e insediativi caratterizzati da strategie collaborative. Gli esiti dell'indagine sono oggetto di discussione critica nella quinta sezione.

Il concetto di ecosistema circolare: revisione della letteratura | La transizione all'Economia Circolare, nel coinvolgere e integrare aspetti di carattere ambientale, economico e sociale (Geissdoerfer et alii, 2017) presuppone un approccio di indagine sistemico (Barquete et alii, 2022). In questa direzione il concetto di ecosistema circolare appare utile per riconoscere e indagare le interdipendenze e le interazioni tra gli attori nella loro appartenenza a una comunità, nonché i processi di condivisione delle risorse (ad esempio informazioni, materia, energia e risorse economiche) nel tempo (Geissdoerfer, Kanda and Kirchherr, 2025). In letteratura il concetto di ecosistema circolare sembra sempre più consolidato, come dimostrato dalla proliferazione di definizioni (Tab. 1) e dall'articolazione delle tematiche coinvolte (Tab. 2).

L'analisi della letteratura evidenzia come gli studi sugli ecosistemi circolari siano principalmente incentrati su tematiche di carattere tecnico e organizzativo – ad esempio flussi di risorse, modelli di business, organizzazione degli stakeholder, ecc. – mentre la dimensione sociale merita ulteriori approfondimenti. Tuttavia, anche se non direttamente collegata al concetto di ecosistemi circolari, la dimensione sociale sta iniziando ad attirare l'attenzione di studiosi e operatori nel dibattito sull'economia circolare.

Analizzando la letteratura è infatti possibile individuare segnali di una recente attenzione per le relazioni tra i temi dell'economia circolare e dell'innovazione sociale (Tab. 3), ma non emerge ancora una sistematizzazione delle possibili declinazioni di tali relazioni e della loro collocazione all'interno del concetto di 'ecosistema circolare'. L'Ecosistema Circolare appare ancora sostanzialmente indagato nei suoi aspetti tecnico-organizzativi; tuttavia molteplici dinamiche tipiche (accesso equo e condivisione di risorse, partecipazione ai processi collettivi, mantenimento di comunità coese e resilienti, accordi istituzionali, processi partecipativi, ecc.) possono avere una forte influenza sulle relazioni tra gli stakeholder (ad esempio sull'intensità delle collaborazioni, sull'entità dei benefici collettivi raggiunti) e generare innovazione sociale, nuovi modelli gestionali, abitativi e insediativi.

Secondo questa prospettiva la circolarità può offrire fertili opportunità per l'innovazione sociale in progetti circolari che, a diverse scale, possono agire come laboratori di sperimentazione, combinando strategie circolari con nuove forme di collaborazione, reti di supporto sociale, potenziamento degli abitanti e sviluppo territoriale (Marchesi and Tweed, 2021; Marchesi, Tweed and Gerber, 2020).

Il concetto di Ecosistema Socio-Circolare | Sulla base di queste premesse il paper propone di estendere il concetto di ecosistema circolare a quello di Ecosistema Socio-Circolare, inteso come sistema spaziale e relazionale, basato su strategie di condivisione e integrazione di molteplici categorie di risorse tangibili e intangibili, (Fig. 1) ossia: 1) informazioni / conoscenze / competenze (condivisione e messa a sistema di esperienze, conoscenze, competenze e know-how; K); 2) spazi (spazi resi disponibili per uso individuale e/o collettivo; S); 3) servizi (attività, funzioni e forme di supporto forniti agli utenti e/o alle comunità; SV); 4) materiali / prodotti (beni fisici, prodotti e oggetti che vengono riutilizzati, scambiati o messi in circolazione; M); 5) energia (flussi di energia, sistemi e infrastrutture per la produzione, distribuzione e utilizzo; E); 6) acqua (flussi d'acqua, sistemi e infrastrutture per la raccolta, il trattamento, la distribuzione e il riutilizzo; W).

Secondo questa interpretazione un Ecosistema Socio-Circolare può assumere la forma di un luogo fisicamente delimitato (un edificio, un quartiere, un campus o un distretto) oppure di una rete distribuita che mette in relazione più luoghi contemporaneamente. In tutti i casi, l'ecosistema socio-circolare persegue due obiettivi principali interdipendenti: 1) ottimizzare l'utilizzo delle risorse; 2) generare innovazione sociale.

All'interno di un Ecosistema Socio-Circolare il modo in cui ogni risorsa può essere prodotta, gestita, condivisa e resa accessibile (in relazione sia agli stakeholder interni all'ecosistema che agli esterni) influisce sull'intensità delle collaborazioni, sull'entità dei benefici collettivi raggiunti / raggiungibili e sulla capacità dell'ecosistema di supportare il contesto fisico-relazionale circostante.

Da questa prospettiva la gestione delle risorse può essere interpretata secondo tre approcci: 1) un approccio chiuso, in cui le risorse sono prodotte e condivise internamente all'Ecosistema Socio-Circolare; 2) un approccio ibrido, in cui le risorse sono prodotte all'interno dell'Ecosistema Socio-Circolare, ma condivise sia con utenti interni che esterni; 3) un approccio aperto, in cui la risorsa viene prodotta all'interno dell'Ecosistema Socio-Circolare e condivisa principalmente con utenti esterni, collegando l'ecosistema a un territorio più ampio.

Tutti questi approcci si basano sullo sviluppo e sulla gestione di strategie di condivisione[3] all'interno di un sistema: in questo senso la condivisione è riconosciuta non solo come una pratica sociale (Katrini, 2018), ma anche come strategia circolare si-

Definition of Circular Ecosystem	Source	Features
«Circular economy ecosystems describe systems of stakeholders (producers, suppliers, etc.), their different roles (orchestrators, brokers, etc.), and the interactions and interrelations (knowledge and information, material and energy, and economic flows) between them, focused at extending, cycling, intensifying, and dematerialising resource loops».	Geissdoerfer, Kanda and Kirchherr, 2025	· multi-actor system · multi-flow interactions · resource-loop strategies
«Circular Ecosystem (CE) is a symbiotic economic model that advocates for a paradigm shift from circular individualism to circular holism achieved through collaboration / platformization, networking and configuration among a community of non-hierarchical heterogeneous actors who are independent yet interdependent and co-create value beyond what a single actor can generate, to achieve sustainable environmental quality, economic prosperity and social equity for customers and ecosystem actors».	Aryee, 2024	· platformisation / networking / configuration · non-hierarchical heterogeneity · independent yet interdependent · value co-creation · triple sustainability outcomes
«A circular ecosystem consists of a group of interdependent, autonomous actors that collectively generate a circular value proposition».	Gomes et alii, 2023	· Autonomous + interdependent actors · collective circular value proposition
«Describes relationships, interdependencies and co-evolutionary interactions between entities exchanging (i) material and energy resources, (ii) economic value, or (iii) knowledge in a particular context».	Kanda, 2023	· Relational / interdependent system · co-evolutionary interactions · exchange flows · context-specificity
«[...] promotes the co-creation of mutual benefits among industrial units based on symbiotic exchanges of materials, energy, and services».	Yu et alii, 2023	· industrial symbiosis · co-creation of mutual benefits · symbiotic exchanges · tangible resource flows · inter-firm collaboration
«Circular ecosystem is a fast-growing phenomenon in which a set of autonomous but interdependent actors jointly create and deliver a coherent circular value proposition». «We define a circular ecosystem as: a system of interdependent and heterogeneous actors that go beyond industrial boundaries and direct the collective efforts towards a circular value proposition, providing opportunities for economic and environmental sustainability».	Trevisan et alii, 2022	· autonomous + interdependent actors · collective effort and delivery · coherent circular value proposition · circular value · economic and environmental outcomes
«Ecosystem as affiliation in the CE context means that all relevant stakeholders along the material flow chain (or loop) must be considered to make circularity a reality. Ecosystem as structure focuses on the activities needed per stakeholder and, hence, the interdependent coordination of activities like the collection of materials at the end of a product's lifecycle and their reintroduction into the circular flow».	Pietrulla, 2022	· affiliation · material flow · coordination across stakeholders · end-of-life collection and reintroduction (take-back / logistics implied)
«We define CE ecosystems as communities of hierarchically independent, yet interdependent heterogeneous set of actors who collectively generate a sustainable ecosystem outcome [...] defined as a system-level outcome typified by circular processes of recycling, reuse, and reduction». «A circular economy (CE) ecosystem is a multi-actor entity in which interdependent actors play complementary roles. Actors include for-profit companies, public services, governmental bodies such as ministries, municipalities and cities, universities, non-profit organizations, and citizen–consumers. A CE ecosystem emerges or is created around a common, system-level goal related to resource circularity, and may involve the creation of CE knowledge, CE businesses, and economic value. Agency varies from focal actor-driven ecosystems to being widely distributed, and the ecosystem structure varies from tightly coordinated CE business models to loosely coupled affiliation structures oriented around CE goals».	Aarikka-Stenroos, Ritala and Thomas, 2021	· community of actors · independent and interdependent · complementary roles · common system-level goal (resource circularity) · circular processes · knowledge / business / value creation · variable agency · variable structure
«A circular ecosystem results from the contributions of various stakeholders; however, the claims and value propositions of these stakeholders can differ, hampering long-term sustainability of the ecosystem. […] sharing people, infrastructure and knowledge, together with mutual trust among stakeholders, are the preconditions of a circular ecosystem. Long-term continuity depends on additional tools that enhance financial self-sufficiency, namely, participative governance, a co-designed circular business model, accountability, frequent engagement, local actions and the development of advocacy power».	Moggi and Dameri, 2021	· stakeholder plurality · value conflicts · shared resources · trust as a precondition · continuity / long-term sustainability · participative governance · local action · co-designed circular business model and financial self-sufficiency
«Building a circular ecosystem needs not only Circular Business Models (BMs) but also expects Circular Supply Chains (CSCs), circular customer behaviours, circular value chains, and circular ecosystem infrastructures in terms of relationships and communities».	Asgari and Asgari, 2021	· circular business models, supply chains, and value chains · customer behaviour · relationships / communities
«We define a Circular Economy (CE) innovation ecosystem as the evolving set(s) of actors, activities, and artefacts, and the institutions and relations that are important for the innovative performance within a circular economy».	Wurster et alii, 2020	· actors, activities, artefacts, institutions, and relations · evolving system · innovation-orientedgoal
«[...] location-specific community of hierarchically independent, yet interdependent actors (such as companies, municipalities, associations, citizens) aiming for environmentally sustainable energy and material flows through optimizing and innovating with material flows and stocks in symbiotic collaboration and by utilizing / contributing / reacting to the wider urban operating environment within which they are located. Industrial CE ecosystems are furthermore place- and time-dependent physical set-ups providing place-specific needs and assets related to the ecosystem. All industrial CE ecosystem actors and materials do not need to be collocated, nor can they as some resources (e.g., rare minerals) and producers are not locally available. This means that the boundaries of an industrial CE ecosystem can vary between different resources. Nevertheless, the ecosystem is characterized by issues specific to a certain area (such as available local side streams or the transport costs of rarer raw materials to that specific area)».	Uusikartano, Väyrynen and Aarikka-Stenroos, 2020	· place-based community · urban operating environment linkage · energy / material flows · optimise / innovate in symbiosis · place / time dependence · resource-dependent· local side-streams and transport constraints
«Co-evolving, dynamic and potentially self-organizing configurations, in which actors integrate resources and co-create circular value flows in interaction with each other».	Aminoff et alii, 2017	· co-evolving · self-organisation · resource integration · circular value flows · interaction

Tab. 1 | Definitions of the concept of 'circular ecosystem' in the literature (credit: the Authors, 2025).

nergicamente integrata con quelle di riparazione, riuso e riciclo (Bocken et alii, 2016). La condivisione si configura quindi come una strategia centrale nell'Ecosistema Socio-Circolare, capace di attivare l'innovazione sociale e le sperimentazioni progettuali attraverso la riformulazione dei modi di usufruire delle risorse e l'introduzione di pratiche quali la partecipazione collettiva, la condivisione della proprietà, la cogestione, ecc. (Mont and Voytenko Palgan, 2025; Rathnayake et alii, 2024; Pérez-Pérez and Nebreda-Calvo, 2024; Atstaja et alii, 2022; Kenter et alii, 2015; Frischmann, 2012).

Nell'ambiente costruito la condivisione implica lo spostamento dalla proprietà all'uso basato sull'accesso collettivo alle risorse fisiche, tecniche e organizzative e si traduce in condivisione dello spazio (coworking, co-living, servizi condivisi, hub logistici o stoccaggio condivisi), delle utenze (infrastrutture condivise di energia, acqua o mobilità), dei servizi (attività partecipative di manutenzione e riparazione, ecc.) e di materiali / prodotti / attrezzature ('library of things', riuso di prodotti, ecc.).

Schema interpretativo dell'utilizzo delle risorse all'interno di un ecosistema socio-circolare | A partire dal concetto di SCE e dalla sua articolazione nei tre approcci (chiuso, ibrido, aperto) viene proposto uno schema interpretativo, finalizzato a leggere le possibili modalità di produzione, uso e condivisione delle risorse e caratterizzato da un duplice ambito di applicazione (ex post ed ex ante), ossia da una parte l'interpretazione di casi reali che possono essere riconosciuti come SCE al fine di valutare l'efficacia delle iniziative esistenti e di individuare possibili strategie per potenziare la generazione di valore sociale, dall'altra il supporto alla pianificazione di nuovi interventi di sviluppo caratterizzati dalle valenze tipiche di un SCE. In questa prospettiva lo schema interpretativo fornisce una griglia di lettura, focalizzata sulle relazioni tra aspetti di circolarità e innovazione sociale, sulle modalità di produzione, uso e condivisione delle sei categorie di risorse (K, S, SV, M, E, W) in relazione agli approcci di ecosistema circolare (chiuso, ibrido, aperto).

La griglia di lettura è stata costruita secondo una metodologia articolata in una serie di fasi. In primo luogo un'indagine sul campo con selezione e analisi di casi caratterizzati da strategie di circolarità fortemente legate al contesto fisico e sociale e riconducibili al concetto di ecosistema circolare. Attraverso il confronto dei casi è stato possibile definire, per ciascuna delle sei categorie di risorse, diverse modalità di gestione in relazione a possibili modelli di condivisione che coinvolgono varie tipologie di stakeholder. Le relazioni tra le modalità di gestione delle risorse e le loro forme di condivisione sono state formalizzate e caratterizzate nella costruzione della griglia di lettura con riferimento ai tre approcci ecosistemici (chiuso, aperto e ibrido): l'applicazione di tale griglia ad ecosistemi circolari consente di riconoscere il loro potenziale di innovazione sociale e quindi di attribuire loro i connotati di SCE. L'ultima fase della metodologia ha previsto la verifica dell'applicabilità della griglia sperimentandola su casi selezionati. La griglia di lettura formalizza le relazioni tra le strategie di circolarità e i modelli di condivisione per ciascuna categoria di risorsa, come riportato di seguito.

Per la categoria 'Informazioni, conoscenza e competenze'[4] (K; Fig. 2):
– 'Self-produced and shared internally' (approccio chiuso); la conoscenza viene principalmente generata all'interno dell'ecosistema (da residenti, utenti, manager e organizzazioni locali) e diffusa solo tra i suoi membri, ad esempio attraverso attività di apprendimento collettivo, formazione tra pari, workshop interni e rapporti;
– 'Self- and externally-produced, and shared internally' (approccio ibrido); la conoscenza deriva da una combinazione di fonti interne (personale tecnico, responsabili di progetto) ed esterne (professionisti, accademia); una volta acquisita, viene condivisa all'interno dell'ecosistema (tramite assemblee, workshop, documentazione, formazione), ma non è condivisa con utenti esterni;
– 'Self- and externally-produced, and shared externally' (approccio aperto); informazioni e competenze sono generate all'interno dell'ecosistema, spesso co-prodotte con partner esterni (Università, Comuni, ONG), e poi condivise sia internamente che esternamente attraverso pubblicazioni, toolkit, linee guida, open data, attività didattiche, conferenze, ecc.; l'ecosistema diventa in questo modo un 'hub di conoscenza' per la comunità.

Per la categoria 'Spazi' (S; Fig. 3)[5]:
– 'User-managed and selectively shared internally' (approccio chiuso); gli spazi sono dedicati agli utenti (locatari a lungo termine di un ufficio, aziende / start-up ed edilizia sociale) e sono gestiti direttamente dall'occupante; la gestione e la eventuale condivisione di questi spazi è dunque basata su decisioni individuali e non su regole collettive di utilizzo;
– 'Self-managed and shared internally and externally' (approccio ibrido); gli spazi sono concepiti come infrastrutture comuni dell'ecosistema (cucine condivise, laboratori, aree di coworking, giardini comuni, sale comunitarie, ecc.) il cui accesso è tipicamente regolato da accordi interni (iscrizione, orari, codici di condotta) e la manutenzione è spesso collettiva; questi spazi condivisi rappresentano aree cruciali in cui si sviluppano legami sociali e pratiche collaborative e possono essere gestiti in modo collettivo (associazione, cooperativa, comitato dei residenti, ecc.) con regole condivise di utilizzo e manutenzione; l'accesso è principalmente riservato ai membri dell'ecosistema, mentre gli utenti esterni possono accedere a tali spazi secondo condizioni specifiche, tipicamente tramite un costo aggiuntivo (ad esempio pagando per utilizzare spazi di coworking).
– 'Self-managed and shared externally' (approccio aperto); gli spazi, esplicitamente orientati al quartiere e alla città, diventano interfacce tra l'ecosistema e il suo contesto urbano; sono aperti (in modo continuativo o in orari specifici) ai non membri e ospitano attività, eventi e servizi per la comunità esterna; questi spazi funzionano come interfacce con il contesto esterno (quartiere, città), generando flussi di persone, idee e risorse che estendono il valore sociale oltre il confine dell'ecosistema, rafforzandone il ruolo di 'hub' locale.

Per la categoria 'Servizi' (SV; Fig. 4)[6]:
– 'Self-organised and shared internally' (approccio aperto); i servizi (ad esempio cooperative di assistenza all'infanzia, 'library of things' e 'repair café') sono organizzati, gestiti e utilizzati dai membri dell'ecosistema (residenti, inquilini e cooperative);
– 'Self-organised and shared internally and externally' (approccio ibrido); i servizi (bar, negozi, atelier e spazi di coworking) sono gestiti da attori interni all'ecosistema (cooperative, PMI e professionisti), ma offerti a pagamento sia agli utenti interni che a quelli esterni;
– 'Self-organised and shared externally' (approccio aperto); servizi (ad esempio programmi di formazione, eventi culturali, consulenza e incubatori) progettati intenzionalmente a servizio della comunità esterna (quartiere o città), spesso con uno scopo sociale o educativo.

Per la categoria 'Materiali e prodotti' (M; Fig. 5)[7]:
– 'Internally sourced and internally circulated' (approccio chiuso): materiali e prodotti vengono recuperati internamente all'ecosistema; il recupero e la rilavorazione possono essere effettuati direttamente dagli utenti o da aziende e organizzazioni che forniscono servizi di riutilizzo e riparazione; materiali e prodotti possono essere condivisi e scambiati tra i membri dell'ecosistema, sia gratuitamente (donazioni e scambi reciproci) sia tramite transazioni monetarie (vendite, affitti e prodotto come servizio);
– 'Externally sourced and internally shared' (approccio ibrido); materiali e prodotti vengono recuperati esternamente all'ecosistema attraverso diversi canali (piattaforme online, donazioni da parte di residenti e organizzazioni, collaborazione con cantieri locali o centri municipali di riutilizzo, acquisto di componenti riutilizzati o materiali riciclati da enti locali) e poi utilizzati all'interno dell'ecosistema;
– 'Externally and internally sourced and externally circulated' (approccio aperto); materiali e prodotti possono essere reperiti sia all'interno dell'ecosistema sia da fornitori esterni (hub di riutilizzo e produttori) per essere riutilizzati dalla comunità esterna; l'ecosistema opera quindi come un nodo all'interno di un sistema più ampio di scambio, generando flussi (in ingresso e in uscita) di materiali e prodotti riutilizzati su scala distrettuale o urbana e non solo all'interno dei propri confini.

Per la categoria 'Energia' (E; Fig. 6)[8]:
– 'Self-produced and shared internally' (approccio chiuso); l'energia è generata all'interno dell'ecosistema (ad esempio impianti fotovoltaici) e distribuita agli utenti interni tramite infrastrutture condivise; la governance è solitamente collettiva (cooperative energetiche e accordi di condominio), con regole comuni per la manutenzione e la ripartizione dei costi;
– 'Self- and externally produced and shared internally' (approccio ibrido); l'energia è prodotta in parte internamente (fotovoltaico, cogenerazione su piccola scala) da fornitori esterni; l'energia è condivisa internamente attraverso infrastrutture comuni e contratti collettivi; residenti e utenti sono collegati agli stessi sistemi e possono negoziare congiuntamente tariffe e selezionare fornitori esterni;
– 'Self-produced and shared externally' (approccio aperto): l'eccesso di energia prodotto internamente all'ecosistema (generazione locale, stoccaggio) viene distribuito all'esterno (distretto) creando comunità energetiche estese.

Per la categoria 'Acqua' (W; Fig. 7)[9] si presume che l'acqua potabile per l'igiene sia fornita dall'acquedotto municipale, mentre le strategie circolari si concentrano principalmente sugli usi non potabili (acqua sanitaria, pulizia e irrigazione) e sulla gestione delle acque meteoriche:
– 'Self-produced and shared internally' (approccio chiuso); l'acqua per usi non potabili della comunità viene raccolta, gestita e riutilizzata internamente (raccolta dell'acqua piovana, stoccaggio); la governance è tipicamente affidata a una cooperati-

va, condominio, associazione o società di gestione che prende decisioni sulla progettazione, sulla manutenzione e sulla ripartizione dei costi;
– 'Self- and externally produced and shared internally' (approccio ibrido); l'acqua per usi non potabili viene prodotta solo parzialmente internamente, tramite l'implementazione di strategie di raccolta e riutilizzo, e fornita in misura prevalente dal Comune;
– 'Self- and externally produced and internally / externally shared' (approccio aperto): i sistemi idrici sono ottimizzati internamente pur essendo funzionalmente integrati in infrastrutture territoriali più ampie (quartiere o distretto).

Features	Topics	Sources
Nature of involved actors	· Business-oriented definitions: ecosystem framed mainly as a network of firms · Territorial definitions: ecosystem expanded to include public agencies and society	Geissdoerfer, Kanda and Kirchherr, 2025; Aryee, 2024; Gomes et alii, 2023; Kanda, 2023; Pietrulla, 2022; Trevisan et alii, 2022; Aarikka-Stenroos, Ritala and Thomas, 2021; Moggi and Dameri, 2021; Wurster et alii, 2020; Uusikartano, Väyrynen and Aarikka-Stenroos, 2020; Aminoff et alii, 2017
Types of resource flows	· Material/product flows: reused products, components, and secondary materials · Energy flows · Information / knowledge flows: data, traceability, know-how, and standards · Economic flows: incentives, value capture, and business models	Geissdoerfer, Kanda and Kirchherr, 2025; Aryee, 2024; Gomes et alii, 2023; Kanda, 2023; Yu et alii, 2023; Pietrulla, 2022; Trevisan et alii, 2022; Aarikka-Stenroos, Ritala and Thomas, 2021; Moggi and Dameri, 2021; Wurster et alii, 2020; Uusikartano, Väyrynen and Aarikka-Stenroos, 2020; Aminoff et alii, 2017
Scale of analysis	· Focal entity (micro): ecosystem as an organisational configuration centred on a focal actor, such as a firm or project · Supply chain (meso): ecosystem as a network of organisations collaborating through exchanges, reverse logistics, and take-back systems · Territorial level (macro): ecosystem as a wider coordination arena shaped by platforms, institutions, policies, and social actors, generating industrial symbiosis, eco-industrial parks, or urban circular initiatives	Pietrulla, 2022; Aarikka-Stenroos, Ritala and Thomas, 2021; Asgari and Asgari, 2021; Moggi and Dameri, 2021; Uusikartano, Väyrynen and Aarikka-Stenroos, 2020; Wurster et alii, 2020
Governance and coordination	· Orchestration by a platform or lead actor · Intermediary roles enabling matches and exchanges · Shared standards and traceability systems · Contractual arrangements for take-back, warranties, and liability · Collaborative governance, sometimes including public actors	Geissdoerfer, Kanda and Kirchherr, 2025; Yu et alii, 2023; Pietrulla, 2022; Aarikka-Stenroos, Ritala and Thomas, 2021; Asgari and Asgari, 2021; Moggi and Dameri, 2021;Uusikartano, Väyrynen and Aarikka-Stenroos, 2020

Tab. 2 | Features of the concept of 'circular ecosystem' in the literature (credit: the Authors, 2025).

Social innovation clusters	Topics	Sources
Collaborative governance and participation	Co-design, participatory decision-making, multi-actor governance, stakeholder cooperation, community engagement, and collective stewardship of resources	Bullinger and Schiller, 2025; Bullinger, 2025; Sica et alii, 2025; Quintelier et alii, 2023; Marchesi and Tweed, 2021
Sharing-based access and collective use	Shared spaces, shared infrastructures, pooling of services, collective use instead of individual ownership, commons-oriented practices, and collaborative consumption	Bullinger, 2025; Bullinger and Schiller, 2025; Quintelier et alii, 2023; Marchesi and Tweed, 2021
Adaptive reuse and life extension of buildings	Reuse of existing buildings, prolongation of building life, regeneration of underused assets, heritage reuse, and neighbourhood revitalisation through circular reuse	Bullinger, 2025; Bullinger and Schiller, 2025
Affordability, inclusion, and community support	Social housing, affordable access, inclusion of vulnerable groups, community services, support for everyday needs, and improved liveability through circular initiatives	Bullinger, 2025; Marchesi and Tweed, 2021
Learning, knowledge exchange, and behavioural change	Circulation of competences, peer learning, community knowledge, awareness-building, capacity building, and behavioural shifts towards circular practices	Bullinger, 2025; Bullinger and Schiller, 2025; Marchesi and Tweed, 2021
Social value creation and well-being	Well-being of inhabitants, quality of life, social relations, sense of belonging, collective benefit, people-centred circularity, and social value as an end rather than a by-product	Quintelier et alii, 2023; Bullinger and Schiller, 2025; Marchesi and Tweed, 2021; Marchesi, Tweed and Gerber, 2020
Justice, ethics, and people-centred circularity	Fair distribution of benefits, ethical motivations, attention to stakeholders, trade-offs between circularity and social outcomes, and the need to put people at the heart of circularity	Carreño-Ortiz, Escobar-Sierra and Lopez-Perez, 2025; Quintelier et alii, 2023
Territorial regeneration and local ecosystem building	Urban regeneration, neighbourhood transformation, local networks, place-based innovation, and circular transition as a territorial and relational process	Bullinger, 2025; Bullinger and Schiller, 2025; Marchesi and Tweed, 2021; Marchesi, Tweed and Gerber, 2020

Tab. 3 | Main clusters and topics emerging from the literature on social innovation issues related to circular economy practices in the built environment (credit: the Authors, 2025).

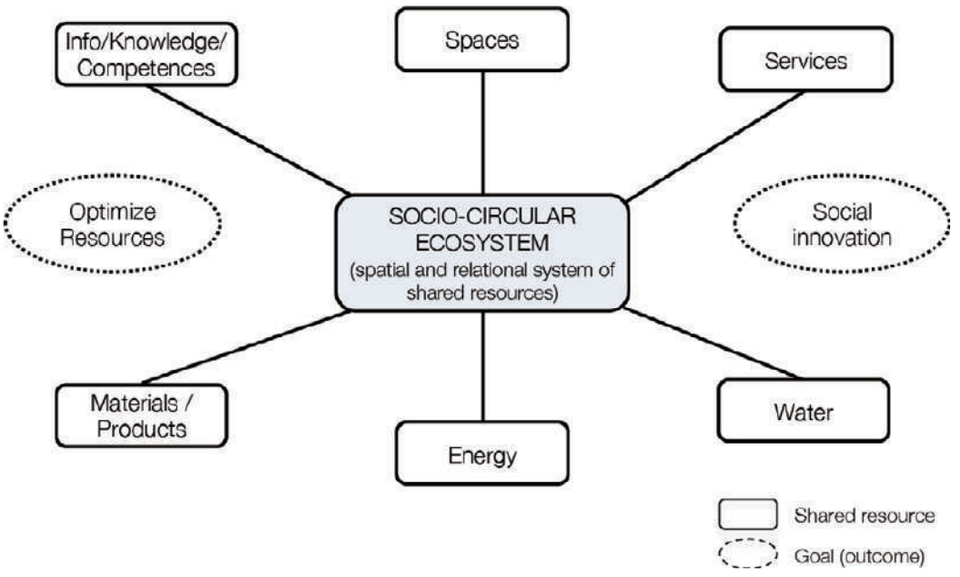


Fig. 1 | Diagram showing the shared resources and the two main objectives of a socio-circular ecosystem (credit: the Authors, 2025).

Applicazione dello schema interpretativo proposto a casi di studio | La proposta di schema interpretativo per l'Ecosistema Socio-Circolare viene applicata a un campione di casi di studio ritenuti significativi. Sono stati considerati i seguenti criteri di selezione per la scelta dei casi:
– Corrispondenza concettuale; ogni caso combina strategie circolari con uno scopo esplicito di innovazione sociale, superando la visione della circolarità come obiettivo puramente ambientale o tecnico;
– Disponibilità dei dati; ogni caso è documentato attraverso rapporti, interviste e osservazione diretta ed è già stato implementato in un contesto reale;
– Contesto geografico; tutti i progetti si trovano in contesti urbani europei, garantendo un certo grado di comparabilità in termini di quadri normativi e sistemi di welfare.

È stata anche presa in considerazione, per la definizione del campione, la diversità degli insediamenti; i casi selezionati coprono quindi scale diverse (edificio, isolato, quartiere) e differenti tipi di insediamento (ex aree industriali, abitazioni, hub a uso misto) e di iniziativa (pubblica, privata e comunitaria). Sono stati identificati dieci casi: Hof van Cartesius (Utrecht, Paesi Bassi); De Ceuvel (Amsterdam, Paesi Bassi); Schoonschip (Amsterdam, Paesi Bassi); People's Pavilion (Eindhoven, Paesi Bassi); BlueCity (Rotterdam, Paesi Bassi); R-URBAN (Colombes, Francia); Royal Docks Circular Construction Hub (Londra, Regno Unito); Ashley Vale (Bristol, Regno Unito); Hammarby Sjöstad (Stoccolma, Svezia); Ekostaden Augustenborg (Malmö, Svezia).

Una prima analisi è stata orientata a fornire una panoramica delle principali informazioni di ciascun caso studio, tra cui: località, anno di avvio, dimensioni, utilizzi principali, proprietà e gestione (relative a terreni, edifici e servizi), fonti di finanziamento e modello economico (Tab. 4)[10]. La seconda fase di analisi riguarda la mappatura dei flussi delle sei categorie di risorse per identificare relative le configurazioni (chiusa, ibrida e aperta). A titolo di esempio la Tabella 5 mostra l'analisi condotta sul progetto Hof van Cartesius (Figg. 8-17); la stessa analisi è stata applicata ai dieci casi studio (Tab. 6).

Hof van Cartesius può essere letto come un Ecosistema Socio-Circolare aperto. In particolare la categoria 'informazioni, conoscenza e competenze' combina gli approcci K1 (chiusa) e K3 (aperta): il know-how interno viene condiviso principalmente all'interno della comunità che segue un'organizzazione a gruppi di lavoro, mentre workshop, visite guidate e la partecipazione a reti circolari aprono questa conoscenza verso l'esterno. Gli 'spazi' presentano un approccio diversificato, dall'accesso chiuso (S1) degli atelier privati a quello ibrido (S2) del cortile e del giardino condivisi, fino all'apertura (S3) degli spazi dedicati a eventi e attività comunitarie. I 'servizi' rappresentano la dimensione più orientata all'esterno, combinando approcci chiusi (SV1), ibridi (SV2) e soprattutto aperti (SV3), poiché le attività volontarie interne coesistono con laboratori pubblici, festival, visite guidate e iniziative orientate alla comunità.

I materiali e i prodotti sono prevalentemente ibridi (M2), poiché la costruzione si basa principalmente su materiali riutilizzati e a base biologica provenienti da reti esterne di riutilizzo, mentre sono presenti anche scambi interni (M1, sistema chiuso) e la redistribuzione verso l'esterno tramite hub di riutilizzo (M3, sistema aperto). Al contrario 'energia' (E1, sistema chiuso) e 'acqua' (W1, sistema chiuso) sono gestite internamente tramite sistemi locali e accordi collettivi. Nel complesso Hof van Cartesius dimostra come un luogo fisicamente delimitato possa generare un valore sociale più ampio attraverso la condivisione selettiva di risorse specifiche (in particolare conoscenze, spazi e servizi) con il quartiere e la città.

Discussione critica e risultati dell'implementazione dello schema interpretativo basato sull'Ecosistema Socio-Circolare | L'analisi dei casi studio tramite il modello dell'Ecosistema Socio-Circolare ha permesso in primo luogo di identificare nuovi legami tra circolarità e effetti sociali: modelli organizzativi basati sulla comunità (l'iniziativa congiunta di imprenditori e costruttori presso Hof van Cartesius), nuovi modi di gestione delle risorse condivise (condivisione di beni, reti di riparazione di mobili e abbigliamento), pratiche circolari orientate alla comunità (uso di materiali di riutilizzo locali derivanti ad esempio da siti di demolizione o da eccedenze di magazzino proveniente dalle imprese edili), creazione di legami sociali all'interno della comunità (scambio di conoscenze, costruzione di reti tra piccole imprese, resilienza economica locale, coinvolgimento della comunità attraverso eventi e attività aperte al pubblico).

Inoltre l'analisi dei casi è stata integrata con un focus sulla dimensione spaziale della strategia di insediamento: ogni caso è stato analizzato all'interno di un diagramma spazio-risorsa (Fig. 18), unendo la strategia di insediamento (dimensione dello spazio – da concentrato a diffuso) e i modelli di condivisione (dimensione delle risorse – da chiuso ad aperto). Sebbene l'approccio 'aperto' del modello di condivisione delle risorse combinato con la strategia di insediamento 'geograficamente diffusa' (ad esempio R-Urban, Ashley Vale) sembri rappresentare il caso ottimale per massimizzare il potenziale complessivo (es. coinvolgimento del pubblico) e il valore (incluso il valore sociale) del progetto circolare, è possibile identificare due strategie spaziali-organizzative ricorrenti.

Un approccio di condivisione 'aperta' funge da facilitatore delle interazioni esterne per progetti geograficamente concentrati; secondo questo approccio alcuni casi studio (Hof van Cartesius, De Ceuvel, BlueCity e il People's Pavilion) operano come centri geograficamente concentrati (edifici) all'interno di una rete spaziale più ampia di ecosistemi aperti. Queste realtà sono spesso caratterizzate da spazi condivisi, servizi collaborativi e attività orientate alla comunità; il loro carattere aperto si manifesta attraverso l'accessibilità, la programmazione culturale, lo scambio di conoscenze e la sperimentazione, ma la loro impronta geografica rimane relativamente limitata. In questo approccio la circolarità implica un'intensa interazione sociale tra diversi progetti (a scala di edificio) all'interno di una dimensione geografica delimitata (distretto).

Un approccio 'chiuso' di condivisione delle risorse e progetto geograficamente diffuso; in questo caso la scala distrettuale e territoriale agisce come generatore di esternalità positive per la comunità. Nei progetti che operano su scala più ampia (distretto e città – Hammarby Sjöstad, Ekostaden Augustenborg) la gestione delle risorse (energia,

acqua, materiali e rifiuti) è principalmente gestita dai Comuni (Royal Docks Circular Conconstruction Hubs) e non dalla comunità stessa. I residenti o gli utenti traggono tuttavia beneficio dai sistemi fisici (principalmente dalle infrastrutture), ma non li gestiscono direttamente. In questi casi la circolarità si persegue principalmente attraverso soluzioni infrastrutturali, mentre gli hub più piccoli risultano maggiormente efficaci nell'attivare pratiche partecipative e nella gestione condivisa delle risorse.

Conclusioni e sviluppi futuri | Il concetto di Ecosistema Socio-Circolare propone un nuovo punto di vista sulle già diffuse realtà di 'ecosistemi circolari' enfatizzando l'importanza della dimensione sociale e contribuendo a colmare una lacuna nella letteratura relativa alle ricadute per la collettività della circolarità – in linea con gli Obiettivi di Sviluppo Sostenibile (SDG) 9, 10, 11 e 12 sui quali il contributo può avere benefici diretti e riscontrabili; si ritiene inoltre ci possa essere un impatto indiretto rispetto agli SDG 1, 2, 3, 4, 6, 7, 8 e 13 che sono legati alle sei categorie di risorse individuate nello schema interpretativo.

Lo schema proposto supporta l'analisi delle iniziative di economia circolare e in particolare: a) fornisce un modello di interpretazione che supporta la comprensione delle iniziative circolari e ne mette in evidenza le potenzialità in termini di innovazione sociale; b) consente di riconoscere come le risorse vengono prodotte, condivise e governate all'interno di un ecosistema, facilitando il confronto tra diverse iniziative attuate a diverse scale applicative; c) evidenzia il ruolo dei modelli di governance collaborativa e delle pratiche collettive negli SCE; d) contribuisce a mettere in luce l'innovazione sociale incorporata nelle strategie circolari, legandola a sperimentazioni di modelli insediativi, fruitivi e abitativi sperimentali.

Le limitazioni di applicabilità dello schema proposto devono essere verificate in relazione alla disponibilità e alla trasparenza dei dati, in particolare di quelli relativi a risorse intangibili quali conoscenze, competenze e servizi. Per quanto concerne la ripetibilità e la trasferibilità lo schema interpretativo proposto può essere applicato a diverse scale (edificio, quartiere, città, territorio) e in diversi contesti d'uso, sociali e culturali, caratterizzati dalla condi-

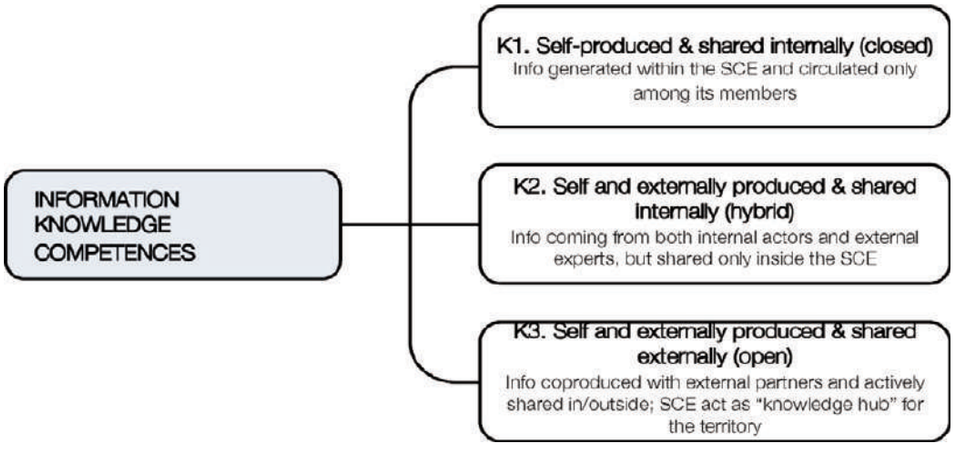


Fig. 2 | Diagram representing the possible approaches to the resource 'Information / knowledge / competences' in a socio-circular ecosystem: (K1) self-produced and shared internally; (K2) self- and externally produced and shared internally; and (K3) co-produced and shared externally (credit: the Authors, 2025).

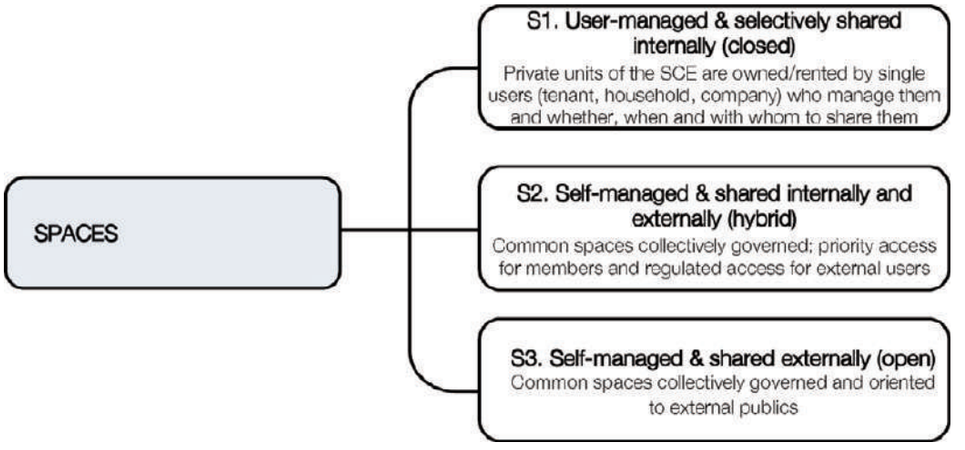


Fig. 3 | Diagram representing the possible approaches of the resource 'Spaces' in a socio-circular ecosystem: (S1) user-managed and selectively shared; (S2) self-managed and shared internally and externally; and (S3) self-managed and shared externally (credit: the Authors, 2025).

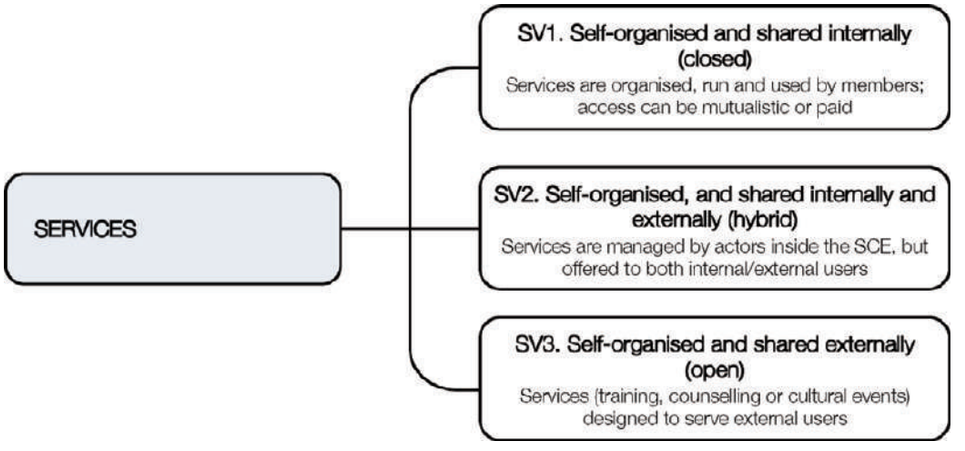


Fig. 4 | Diagram representing the possible approaches to the resource 'Services' in a socio-circular ecosystem: (SV1) self-organised mutual services; (SV2) self-organised services shared internally and externally; and (SV3) self-organised services open to external users (credit: the Authors, 2025).

visione di risorse (housing sociale, residenze pubbliche convenzionate, living lab, co-working, co-living, hoteling, franchising, ecc.).

Gli sviluppi futuri dovrebbero mirare ad ampliare e approfondire il campione di casi analizzati che nello studio è stato concentrato sui Paesi del Nord Europa, per i quali esistono pratiche consolidate di condivisione delle risorse. Al fine di testare ulteriormente la solidità dello schema interpretativo in diversi contesti geografici, tipi di insediamenti e strutture di governance, gli sviluppi dovranno comprendere un'estensione del campione a Paesi diversi. Un altro aspetto riguarda la definizione dei criteri per delineare i confini degli SCE, al fine di valutarne l'area di influenza anche al di là dei confini fisici del sistema. Infine appare rilevante il coinvolgimento di esperti delle discipline sociali, al fine di perfezionare l'analisi dell'innovazione sociale, anche in relazione agli aspetti della partecipazione, della coesione sociale, dell'accesso alle risorse e dell'evoluzione a lungo termine delle comunità.

In the built environment, the circular economy has progressively moved from being understood as a set of environmental strategies focused on the optimisation of resources[1] to a broader vision that also includes aspects related to architectural design, urban regeneration (Semprebon et alii, 2021), and territorial development, as mirrored, for example, in the New European Bauhaus proposals (Gkatzogias, Romano and Negro, 2024). While the most consolidated interpretations of circular strategies mainly concern the 'nano' scale (material cycle and waste reduction), more recently the topic of circularity has expanded to the micro (buildings), meso (neighbourhoods, districts, and networks), and macro (cities and regions) scales, as highlighted by Khadim et alii (2022).

Experiences such as cooperative housing for rural regeneration (Eixerés Ros, 2025), collaborative energy districts (Crippa et alii, 2024), co-designed welfare spaces (Campagnaro et alii, 2025; Arquilla and Caruso, 2025), service infrastructures for reuse and recycling (Olivastri and Tagliasco, 2024), and local micro-networks operating in various areas of the green transition (Gaddi and Ma-

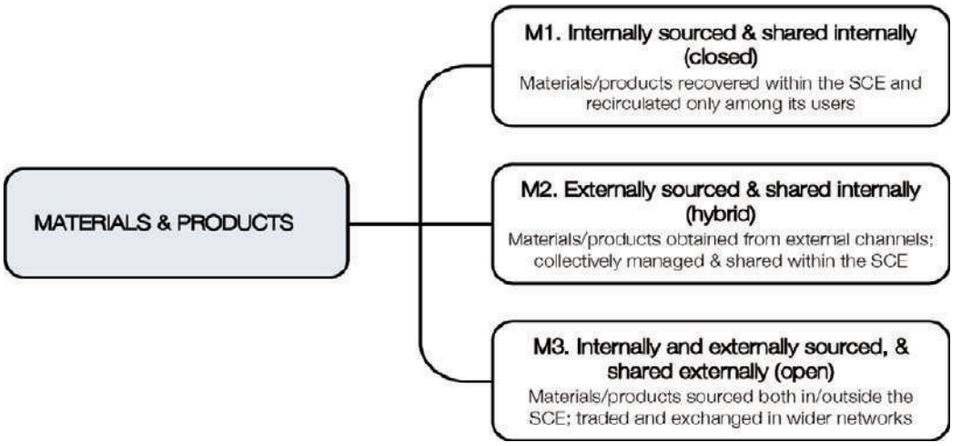


Fig. 5 | Diagram representing the possible approaches to the resource 'Materials and products' in a socio-circular ecosystem: (M1) internally sourced and internally circulated; (M2) externally sourced and internally shared; and (M3) internally and externally sourced and externally circulated (credit: the Authors, 2025).

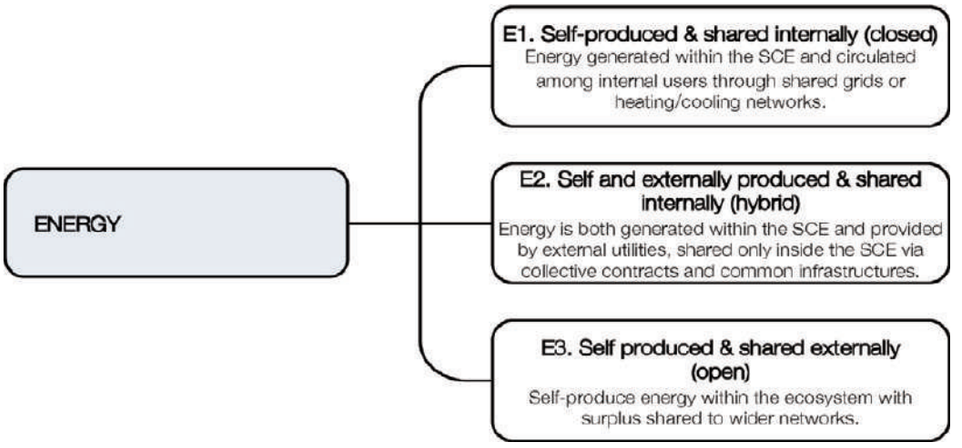


Fig. 6 | Diagram representing the possible approaches to the resource 'Energy' in a socio-circular ecosystem: (E1) self-produced and shared internally; (E2) self- and externally produced and shared internally; and (E3) self-produced and shared externally (credit: the Authors, 2025).

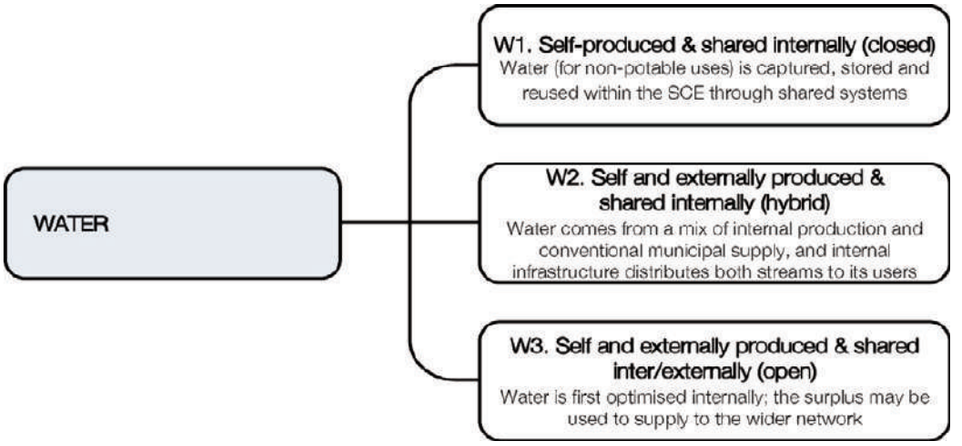


Fig. 7 | Diagram representing the possible approaches to the resource 'Water' in a socio-circular ecosystem: (W1) self-produced and shared internally; (W2) self- and externally produced and shared internally; and (W3) self- and externally produced and shared internally and externally (credit: the Authors, 2025).

	Hof van Cartesius	De Ceuvel	Schoonschip	People's Pavilion	BlueCity	R-URBAN	Royal Docks Circular Construction Hub	Ashley Vale	Hammarby Sjöstad	Ekostaden Augustenborg
Location	Utrecht NL	Amsterdam NL	Amsterdam NL	Eindhoven NL	Rotterdam NL	Colombes FR	London UK	Bristol UK	Stockholm SE	Malmö SE
Opening year	2017	2014	2020	2017	2015	2014	2026	2001	1999	1998
Size	~3,500 m²	~3,700 m²	~5,000 m²	~250 m²	~12,000 m²	network	network	2.1 ac (~8,500 m²)	~200 ha (~2,000,000 m²)	32 ha (~320,000 m²)
Settlement type	NBHD	NBHD	NBHD	BLD	BLD	NET	NET	DIST	DIST	DIST
Development type	REG	REG	NEW	NEW	REG	NEW+REG	NEW+REG	REG	REG	REG
Initiative type	CIV	CIV	CIV	PUB-PRIV	CIV-PRIV	CIV-PUB	PUB-CIV	CIV	PUB	PUB
Main uses	WSP	WSP	RES	EXH	HUB	AGR, RES	HUB	RES	RES	RES
Ownership (Land)	PUB	PUB	PUB	PUB	PRIV	PUB	PUB	PRIV	PUB	PUB
Ownership (Built assets)	COOP	PRIV	PRIV	PUB	PRIV	NPO	PUB	PRIV	PUB-PRIV	PUB
Ownership (Services)	COOP	CIV	COOP	PUB	NPO	NPO	NGO	CIV	PUB	PUB
Management (Land)	PUB	PUB	PUB	PUB	PRIV	PUB	PUB	CIV	PUB	PUB
Management (Built assets)	COOP	CIV	PRIV	PUB	NPO	NPO	NGO	CIV	PUB-PRIV	PUB
Management (Services)	COOP	CIV	COOP	PUB	NPO	NPO	NGO	CIV	PUB	PUB
Funding sources	INV, LOAN, SELF	GRANT, SELF	INV, LOAN	GRANT, INV	GRANT, INV, SELF	EU, GRANT	GRANT	INV, LOAN, SELF	GRANT, INV	GRANT
Economic model	RENT, MEM, SERV, EVENT	RENT, SERV, EVENT	SERV, MEM	EVENT, SERV	RENT, SERV, EVENT	SERV, MEM, EVENT	SERV, SUB	SELF, SERV	SERV, RENT	SUB, SERV

Tab. 4 | Overview of the selected European socio-circular ecosystem initiatives; the sources of information for the analysis of the case studies include project documentation, policy reports, academic literature and semi-structured interviews with key actors. The table reports location, opening year, size, main uses, ownership and management (related to land, built assets, and services), funding sources, and the economic model of each case study (credit: the Authors, 2025).

strolonardo, 2024), and pro-social materials developed through inclusive local micro-supply chains (Del Curto, Valassina and Santi, 2025) demonstrate how circular strategies increasingly involve participatory governance models, collective infrastructures, and co-design at different scales.

This evolution in the implementation of circular strategies suggests a conceptual shift, from isolated circular buildings to larger-scale interventions, in which settlement, social, organisational, and economic dimensions interact synergistically. On a larger scale, the social dynamics generated by circular initiatives reveal a high degree of complexity and open up experimental housing and settlement models, as well as new collaborative ways of living and working, and new relationships at territorial level. Consequently, at the meso and macro scales, the synergies between technical, environmental, and social dimensions[2] require the adoption of original interpretative keys.

Starting from these premises and on the basis of an analysis of European 'circular' and socially oriented projects, this paper proposes the concept of Socio-Circular Ecosystem, which derives from and expands the concept of the circular ecosystem. The underlying hypothesis is that circular strategies implemented in the built environment can generate social value within relational and spatial systems (socio-circular ecosystem), in which stakeholders share and co-manage tangible and intangible resources. In this sense, the SCE acts as an interpretative framework for incorporating the tangible (technical) and intangible (social) dimensions of circularity in the investigation of environmental, technical, and social implications in the short and long term, at various scales, from the micro to the meso scale. In particular, adopting a 'meso-scale' perspective allows to investigate circular projects from multiple perspectives, placing them in a systemic vision that includes: 1) the organisation and management of shared resources; 2) the roles of stakeholders and relational models; 3) the conditions under which governance and community-based business models support long-term value generation.

Therefore, the paper aims to propose the concept of Socio-Circular Ecosystem as an innovative interpretative framework, useful for analysing circularity, social innovation, governance, and resource sharing in an integrated manner within the built environment. By adopting a holistic approach and overcoming the partial view of the well-known concept of the Circular Ecosystem, the paper helps fill an interpretative gap that has emerged in the literature. In particular, in the first section, the paper outlines the state of the art of Circular Ecosystems, highlighting the main gaps in the literature regarding the social dimension of circularity. The second section introduces the innovative concept of the Socio-Circular Ecosystem (SCE), understood as a spatial and relational system based on strategies for sharing and integrating multiple categories of tangible (spaces and materials) and intangible (information, services, and energy) resources. In the third section, starting from the concept of SCE, an interpretative framework is proposed to define the different possible approaches (closed, hybrid and open) to the management of resources within circular ecosystems, highlighting the types of relationships between aspects of circularity and social innovation. In the fourth section, the interpretative framework is applied to a sample of SCE cases selected at the European level to test its effectiveness in identifying circularity strategies based on resource sharing and capable of driving social innovation.

The aim is to identify, at different scales, the conditions and modes of development and growth of housing and settlement models characterised by collaborative strategies. The survey results are critically discussed in the fifth section.

The concept of circular ecosystem: a literature review | The transition to the circular economy, involving and integrating environmental, economic, and social aspects (Geissdoerfer et alii, 2017), requires a systemic approach to investigation (Bar-

Resource category	Specific resources	Shared? Yes	Shared? No	Configuration	Sources
Information, knowledge, competences (K)	Internal know-how on circular construction, reuse logistics, and cooperative management among initiators, board members, and tenants	✓		K1 (closed)	Hof van Cartesius official website; Authors' interviews and site visit (2026)
	Knowledge organised by teams among the 120 involved entrepreneurs (Garden / Events / Communication / Maintenance / Renters / Finance / Caring teams), for internal users	✓		K1 (closed)	Authors' interviews and site visit (2026)
	Sociocratic governance knowledge shared among the 120 members (i.e. consent-based decision-making and collective responsibility), who meet every four months	✓		K1 (closed)	Authors' interviews and site visit (2026)
	Internal workshops (circular economy, social media, photography, sewing, carpentry, and finance) open to visitors, professionals, and students	✓		K3 (open)	Hof van Cartesius official website; Authors' interviews and site visit (2026)
	Guided tours presenting Hof van Cartesius as a circular hotspot for external visitors (companies, municipalities, students, etc.)	✓		K3 (open)	Hof van Cartesius official website; Authors' interviews and site visit (2026)
	Participation in wider circular networks and events (e.g. Week of the Circular Economy and the Circular Economy Booster), as well as cultural events and festivals (Summer Festival and Music Festival) open to external visitors	✓		K3 (open)	Hof van Cartesius official website; Authors' interviews and site visit (2026)
	Collaboration with universities and inclusion in reports / funding programmes as a circular hotspot	✓		K3 (open)	Hof van Cartesius official website
Spaces (S)	Private ateliers and studios rented by individual entrepreneurs (user-managed units)	✓		S1 (closed)	Hof van Cartesius official website; Authors' interviews and site visit (2026)
	Shared courtyard / garden as an internal common space for tenants, occasionally used by neighbours	✓		S2 (hybrid)	Hof van Cartesius official website; Authors' interviews and site visit (2026)
	Event / meeting spaces and outdoor areas used for public workshops, festivals, and cultural events open to the wider community	✓		S3 (open)	Hof van Cartesius official website; Authors' interviews and site visit (2026)
	Solidarity shop, free-goods corner, and book library oriented towards the neighbourhood (on the adjacent strip)	✓		S3 (open)	Authors' interviews and site visit (2026)
Services (SV)	Provision of affordable workspaces for sustainable and creative entrepreneurs	✓		SV2 (hybrid)	Hof van Cartesius official website; Authors' interviews and site visit (2026)
	Workshops, cultural events, and festivals open to external visitors (e.g. circularity and culture programmes)	✓		SV3 (open)	Hof van Cartesius official website; Authors' interviews and site visit (2026)
	Guided tours for external groups (professionals, students, municipalities, companies)	✓		SV3 (open)	Hof van Cartesius official website
	Networking and visibility platform for circular makers and SMEs at district / city scale	✓		SV3 (open)	Hof van Cartesius official website
	Public café accessible to non-tenants	✓		SV2 (hybrid)	Authors' interviews and site visit (2026)
	Public solidarity shop (free-goods corner)	✓		SV3 (open)	Authors' interviews and site visit (2026)
	Open book library for neighbours and visitors	✓		SV3 (open)	Authors' interviews and site visit (2026)
	Voluntary work by internal users contributing to the internal functioning of the site (maintenance, event / workshop organisation, garden care)	✓		SV1 (closed)	Authors' interviews and site visit (2026)
	Voluntary work by internal users contributing to public-facing services (festivals, workshops, and solidarity shop)	✓		SV2 (hybrid)	Authors' interviews and site visit (2026)
Materials and products (M)	High level (> 90%) of reused and bio-based materials in construction (structural and façade elements, sandwich panels, doors, windows, beams, hemp insulation, sheep wool for sealing gaps, etc.)	✓		M2 (hybrid)	Hof van Cartesius official website; Authors' interviews and site visit (2026)
	New materials used mainly for screws, glues, small framing and some insulation		✓		Hof van Cartesius official website
	Sourcing reused products from secondary-material brokers (Superuse) and online platforms (Marktplaats, Oogstkaart, Gebruiktebouwmaterialen, Insert, and Excess Exchange Materials)	✓		M2 (hybrid)	Hof van Cartesius official website; Authors' interviews and site visit (2026)
	Sourcing reused products from industrial waste from the public railway sector (ProRail, Nederlandse Spoorwegen) at the end of their service life: yellow timetable panels used as façade cladding, train windows, and rail tracks repurposed as structural elements	✓		M2 (hybrid)	Hof van Cartesius official website; Authors' interviews and site visit (2026)
	Sourcing reused products from donations or offers of surplus or damaged products from private buildings (schools in Rotterdam, warehouses, and Dudok-designed garage elements): reclaimed CLT and steel trusses	✓		M2 (hybrid)	Hof van Cartesius official website; Authors' interviews and site visit (2026)
	Sourcing recycled materials / reused products from on-site hubs (Buurman, Upcycle, and Meublowski) acting as collectors of good municipal waste and as storage and internal redistribution hubs (household appliances, textiles, wood, e-waste, and bikes)	✓		M3 (open)	Hof van Cartesius official website; Authors' interviews and site visit (2026)
	Informal internal exchange of products and leftover materials between tenants (e.g. clothes swap)	✓		M1 (closed)	Authors' interviews and site visit (2026)
Energy (E)	Energy consumption regulated by common agreements: no heating above ~18 °C and no mechanical cooling, with design assumptions based on Dutch maximum summer temperaturesofaround 35 °C	✓		E1 (closed)	Authors' interviews and site visit (2026)
	Hybrid renewable-energy system combining air-to-air and air-to-water heat pumps, enabling some pavilions to be self-sufficient and to distribute energy to other pavilions	✓		E1 (closed)	Authors' interviews and site visit (2026)
	Different heating configurations across buildings: underfloor heating on ground floors, and solar-supported heating (PV panels) and heat pumps on upper floors		✓		Authors' interviews and site visit (2026)
Water (W)	Rainwater harvesting and on-site storage Conventional connection to the municipal drinking-water network Conventional connection to municipal sewer for wastewater	✓		W1 (closed)	Hof van Cartesius official website; Authors' interviews and site visit (2026)

Tab. 5 | Implementation of the SCE interpretative framework for the resources of the Hof van Cartesius case (credit: the Authors, 2025).


HET
HOF
VAN


HET
HOF
VAN
CAR
TES
IUS

quete et alii, 2022). In this regard, the concept of a circular ecosystem is useful for recognising and investigating interdependencies and interactions among actors within a community, as well as the processes of sharing resources (e.g., information, matter, energy, and economic resources) over time (Geissdoerfer, Kanda and Kirchherr, 2025). In the literature, the concept of a circular ecosystem is increasingly well established, as evidenced by the proliferation of definitions (Tab. 1) and the articulation of its related features (Tab. 2).

The literature analysis shows that studies on circular ecosystems are mainly focused on technical and organisational issues – e.g., resource flows, business models, stakeholder organisation, etc. – while the social dimension deserves further investigation. However, even if not directly related to the concept of circular ecosystems, the social dimension is starting to attract the attention of scholars and practitioners in the Circular Economy debate.

Analysing the literature, it is possible to identify emerging signals (Tab. 3) of recent attention to the relationships between the themes of Circular Economy and social innovation, but there is still no systematisation of the possible declinations of these relationships and their placement within the concept of Circular Ecosystem. The Circular Ecosystem still appears to be substantially investigated in its technical-organisational aspects, however many of its typical dynamics (equitable access and sharing of resources, participation in collective processes, maintenance of cohesive and resilient communities, institutional agreements, participatory processes, etc.) can have a strong influence on relationships between stakeholders (e.g., on the intensity of collaborations, on the extent of collective benefits achieved) and generate social innovation, new management, housing, and settlement models.

According to this perspective, circularity can offer promising opportunities for social innovation in circular projects that, at different scales, can act as laboratories of experimentation, combining circular strategies with new forms of collaboration, social support networks, community empowerment and territorial development (Marchesi and Tweed, 2021; Marchesi, Tweed and Gerber, 2020).

The concept of Socio-Circular Ecosystem | On this basis, the paper proposes extending the concept of circular ecosystem to that of Socio-Circular Ecosystem, understood as a spatial and relational system, based on strategies for sharing and integrating multiple categories of tangible and intangible resources (Fig. 1): 1) information / knowledge / competences (sharing and systematisation of

Previous page

Figg. 8, 9 | Street-side and corner view of the Brandweer pavilion (gateway building), showing the patchwork façade of reclaimed timber boards and coloured panels, the permeable metal screen and the entrance signature of 'Het Hof van Cartesius' (credits: the Authors, 2025).



Fig. 10 | Street-side view of the circular materials hub Buurman (the warehouse, workshop and shop of second-hand and upcycled wood products) within 'Hof van Cartesius', characterised by a patchwork façade of reused cladding panels (credit: the Authors, 2025).



Fig. 11 | Rear façade of Spoor pavilion within 'Hof van Cartesius', the two-storey studio strip with reused cladding systems and a continuous balcony, where climbing vegetation forms a green buffer between indoor workspaces (credit: the Authors, 2025).







Previous page

Fig. 12 | The Bomtoren tower within 'Hof van Cartesius', multi-storey timber volume with a fully glazed south façade, making visible the layered coworking and meeting spaces (credit: the Authors, 2025).

Figg. 13, 14 | Reused train windows in façade of the Burmese pavilion within 'Hof van Cartesius': the window on the left is integrated into a green-and-grey corrugated metal façade; the window on the right is framed by reused Dutch railway timetable panels (credits: the Authors, 2025).



Fig. 15 | Outdoor storage of salvaged construction materials at Buurman within 'Hof van Cartesius': external storage area where reclaimed steel beams, timber joists and concrete blocks are stacked (credit: the Authors, 2025).



Fig. 16 | Interior view of the circular timber warehouse at Upcycle within 'Hof van Cartesius', with sorted reclaimed wood stock and workstations, accessible to professional makers and local residents for small-scale construction, repair and experimentation (credit: the Authors, 2025).

experiences, knowledge, skills, and know-how) – K; 2) spaces (spaces made available for individual and/or collective use) – S; 3) services (activities, functions and forms of support provided to users and/or communities) – SV; 4) materials/products (physical goods, products and objects that are reused, exchanged or put into circulation) – M; 5) energy (energy flows, systems, and infrastructures for production, distribution and use) – E; 6) water (water flows, systems, and infrastructure for collection, treatment, distribution and reuse) – W.

According to this interpretation, a Socio-Circular Ecosystem can take the form of a physically delimited place (a building, a neighbourhood, a campus, or a district) or a distributed network that connects several places simultaneously. In all cases, the socio-circular ecosystem pursues two main interdependent objectives: 1) to optimise the use of resources; 2) to generate social innovation.

Within a Socio-Circular Ecosystem, the way in which each resource can be produced, managed, shared, and made accessible (in relation to both internal and external stakeholders) affects the intensity of collaborations, the extent of collective benefits achieved and potentially achievable and the ability of the ecosystem to interact and support the surrounding physical-relational context.

From this perspective, resource management can be interpreted according to three approaches: 1) a closed approach, in which resources are produced and shared within the Socio-Circular Ecosystem; 2) a hybrid approach, in which resources are produced within the Socio-Circular Ecosystem but shared with both internal and external users; 3) an open approach, in which the resource is produced within the Socio-Circular Ecosystem and shared mainly with external users, connecting the ecosystem to a wider territory.

All these approaches are based on developing and managing sharing strategies[3] within a system. In this sense, sharing is recognised not only as a social practice (Katrini, 2018), but also as a circular strategy synergistically integrated with those of repair, reuse, and recycling (Bocken et alii, 2016). Sharing is therefore configured as a central strategy in the Socio-Circular Ecosystem, capable of activating social innovation and design experimentation through the reformulation of ways of using resources and the introduction of practices such as collective participation, shared ownership, co-management, etc. (Mont and Voytenko Palgan,



Fig. 17 | Example of upcycled furniture by Upcycle, within 'Hof van Cartesius', displayed against an interior wall clad with reclaimed timber offcuts, illustrating the transformation of recovered materials into new products and finishes (credit: the Authors, 2025).

2025; Rathnayake et alii, 2024; Pérez-Pérez and Nebreda-Calvo, 2024; Atstaja et alii, 2022; Kenter et alii, 2015; Frischmann, 2012).

In the built environment, sharing implies the shift from ownership to use based on collective access to physical, technical, and organisational resources and translates into sharing space (co-working, co-living, shared services, shared logistics hubs, or shared storage), utilities (shared energy, water, or mobility infrastructure), services (participatory maintenance and repair activities, etc.) and materials / products / equipment ('library of things', reuse of products, etc.).

Interpretative framework for resource use within a Socio-Circular Ecosystem | Based on the concept of SCE and its articulation in the three approaches (closed, hybrid, open), an interpretative framework is proposed, aimed at reading the possible methods of production, use and sharing of resources and characterised by a dual scope of application (ex post, ex ante): on the one hand, the interpretation of real cases that can be recognised as SCEs in order to evaluate the effectiveness of existing initiatives and to identify possible strategies to enhance the generation of social value; on the other hand, support for the planning of new development interventions characterised by the typical values of a SCE.

From this perspective, the interpretative framework provides a reading grid focused on the relationships between circularity and social innovation, and on the modes of production, use and sharing of the six categories of resources (K, S, SV, M, E, W) in relation to circular ecosystem approaches (closed, hybrid, open).

The reading grid was built using a methodology divided into a series of phases. First, a field investigation was conducted through the selection and analysis of cases characterised by circularity strategies strongly linked to the physical and social context and attributable to the concept of circular ecosystem. By comparing the cases, it was possible to define, for each of the six resource categories, different ways of managing them in relation to possible sharing models involving various types of stakeholders.

The relationships between the methods of resource management and their forms of sharing have been formalised and characterised in the construction of the reading grid with reference to the three ecosystem approaches (closed, open, and hybrid): the application of this grid to circular ecosystems allows for the recognition of their potential for social innovation and therefore to attribute SCE connotations to them. The last phase of the methodology consists of verifying the applicability of the grid by testing it on selected cases. The reading grid formalises the relationships between circularity strategies and sharing models for each resource category as follows.

For the category 'Information, knowledge and competences'[4] (K; Fig 2):
– Self-produced and shared internally (closed approach); knowledge is mainly generated within the ecosystem (by residents, users, managers and local organisations) and disseminated only among its members, for example, through collective learning activities, peer training, internal workshops, and reports;
– Self- and externally-produced, and shared internally (hybrid approach); knowledge comes from a combination of internal (e.g., technical staff, and project managers) and external (e.g., professionals, academia) sources; once acquired, it is shared within the ecosystem (through assemblies, workshops, documentation, training), but is not shared with external users;
– Self- and externally-produced, and shared externally (open approach); information and expertise are generated within the ecosystem, often co-produced with external partners (Universities, municipalities, and NGOs), and then shared both internally and externally through publications, toolkits, guidelines, open data, educational activities, conferences, etc.; the ecosystem thus becomes a 'knowledge hub' for the community.

For the category 'Spaces' (S; Fig. 3)[5]:
– User-managed and selectively shared internally (closed approach); spaces are dedicated to users (e.g., long-term tenants of an office, companies / start-ups and social housing) and are managed directly by the occupant; therefore the management and possible sharing of these spaces is based on individual decisions and not on collective rules for use;
– Self-managed and shared internally and externally (hybrid approach); spaces are conceived as common ecosystem infrastructures (e.g., shared kitchens, laboratories, coworking areas, communal gardens, community rooms, etc.) whose access is typically regulated by internal agreements (membership, hours, codes of conduct) while maintenance is often collective; these shared spaces represent crucial areas where social ties and collaborative practices are developed and can be managed collectively (association, cooperative, residents' committee, etc.), with shared rules of use and maintenance; access is primarily reserved for ecosystem members, while external users can access such spaces under specific conditions, typically via an additional fee (e.g., paying to use co-working spaces);
– Self-managed and shared externally (open approach); the spaces, explicitly oriented to the neighbourhood and the city, become interfaces between the ecosystem and its urban context; they are open (continuously or at specific times) to non-members and host activities, events, and services for the external community. These spaces function as interfaces with the external context (neighbourhood, city), generating flows of people, ideas, and resources that extend social value beyond the ecosystem's boundary, strengthening its role as a local 'hub'.

For the category 'Services' (SV; Fig. 4)[6]:
– Self-organised and shared internally (closed approach); services (e.g., childcare cooperatives, a 'library of things', and a 'repair café') are organised, managed, and used by ecosystem members (residents, tenants and cooperatives);
– Self-organised and shared internally and externally (hybrid approach); services (e.g., bars, shops, ateliers, and coworking spaces) are managed by actors within the ecosystem (cooperatives, SMEs and professionals), but offered for a fee to both internal and external users;
– Self-organised and shared externally (open approach); services (e.g., training programmes, cultural events, counselling, and incubators) intentionally designed to serve the external community (neighbourhood or city), often with a social or educational purpose.

For the category 'Materials and products' (M; Fig. 5)[7]:
– Internally sourced and internally circulated (closed approach); materials and products are recovered within the ecosystem; recovery and reprocessing can be carried out directly by users or by companies and organisations that provide reuse and repair services; materials and products can be shared and exchanged between members of the ecosystem, either free of charge (donations and mutual exchanges) or through monetary transactions (sales, rentals, and product-as-a-service);
– Externally sourced and internally shared (hybrid approach); materials and products are recovered outside the ecosystem through different channels (e.g., online platforms, donations from residents and organisations, collaboration with local construction sites or municipal reuse centres, purchase of reused components, or recycled materials from local authorities) and then used within the ecosystem;
– Externally and internally sourced and externally circulated (open approach); materials and products can be sourced both within the ecosystem and from external suppliers (reuse hubs and manufacturers) to be reused by the external community; the ecosystem therefore operates as a node within a broader system of exchange, generating flows (in and out) of reused materials and products on a district or urban scale, and not only within its own borders.

For the category 'Energy' (E; Fig. 6)[8]:
– Self-produced and shared internally (closed approach); energy is generated within the ecosystem (e.g., photovoltaic systems) and distributed to internal users through shared infrastructure; governance is usually collective (e.g., energy cooper-

Case study	Description	Resource Configuration	Spatial Configuration	Strengths	Weaknesses / criticalities	Feasibility requirements	Transferability
Hof van Cartesius	Circular workspace community built with reused and recycled materials	O	Concentrated	Strong mix of circular workspaces, shared services, and collaborative community; adaptive reuse logic combined with entrepreneurial and social interaction; openness to external networks and visitors	Dependence on active community management and tenant engagement; economic viability tied to occupancy and the local ecosystem; partly context-dependent governance model	Access to affordable land or transitional sites, strong coordination body, local entrepreneurial network, and capacity to manage shared spaces and services	Medium
De Ceuvel	Regenerative hub created from reused houseboats on polluted land	H	Concentrated	Strong mix of circular experimentation, community-building, and external openness; shared workspaces and public-oriented services; knowledge exchange with external actors	Complex management; dependence on committed actors; temporary and context-specific conditions	Supportive regulation, interdisciplinary design capacity, active local network, and willingness to experiment	High
Schoonschip	Floating residential community	C	Concentrated	Strong resident community; shared energy and water systems; integration of technical circularity with collective organisation	High technical complexity; high initial costs; model mainly tailored to a specific residential community	Advanced technical expertise, coordinated governance, financial capacity, and resident commitment	Medium
People's Pavilion	Temporary pavilion built from borrowed materials	O	Concentrated	High symbolic value; strong demonstration of reuse and reversibility; public visibility and educational impact	Temporary character; limited long-term organisational continuity; reduced everyday social embeddedness	Event-based funding, strong curatorial and design coordination, and access to reused materials	Medium
BlueCity	Circular hub for entrepreneurs located in a former swimming pool	O	Concentrated	Circular entrepreneurship hub; strong networking and knowledge-sharing role; services and spaces open to external users	Dependence on business viability and ecosystem management; risk of uneven access to benefits	Entrepreneurial ecosystem, governance capacity, economic sustainability, and local demand	Medium
R-URBAN	Network of civic hubs promoting urban resilience through local food, recycling, and housing services	O	Widespread	Systemic integration of social, environmental, and economic aims; strong community orientation; resourcesharing across functions	Organisational complexity; dependence on public support and long-term coordination; fragile continuity	Political support, active civic participation, multi-actor governance, and flexible implementation framework	Medium
Royal Docks Circular Construction Hub	Urban hub for construction-material reuse	H	Widespread	Strong role in material reuse at urban scale; links circular construction to local resource flows; strategic infrastructural potential	Strong dependence on policy support and construction-sector coordination; limited direct community management	Public backing, active construction supply chain, logistics infrastructure, and stable institutional support	Medium
Ashley Vale	Self-build housing project	H	Widespread	Strong self-build and community dimension; collective ownership logic; high social cohesion	Difficult to replicate; highly dependent on local land conditions, community capacity, and specific historical context	Cohesive community, access to land, participatory culture, and long-term resident engagement	Low
Hammarby Sjöstad	Eco-district integrating energy, water, and waste flows in a closed-loop	C	Widespread	High infrastructural efficiency; strong integration of energy, water, and waste systems; large-scale urban impact	Mainly top-down model; limited direct participation in resource management; social innovation less explicit	Strong public governance, major investments, advanced infrastructure, and integrated planning framework	Low
Ekostaden Augustenborg	Regenerated neighbourhood with green infrastructure	C	Widespread	Effective integration of water and environmental infrastructures; positive neighbourhood-scale regeneration effects	Strong dependence on public governance; limited shared management by users; context-specific welfare conditions	Institutional continuity, public investment, long-term maintenance, and supportive policy framework	Low

Tab. 6 | Critical analysis of case studies. For each case study, the table shows: the predominant approach classified as Open – O, Hybrid – H, or Closed – C; spatial configurations, classified as Concentrated or Widespread; strengths, weaknesses, feasibility requirements, and transferability, classified as High, Medium, or Low (credit: the Authors, 2025).

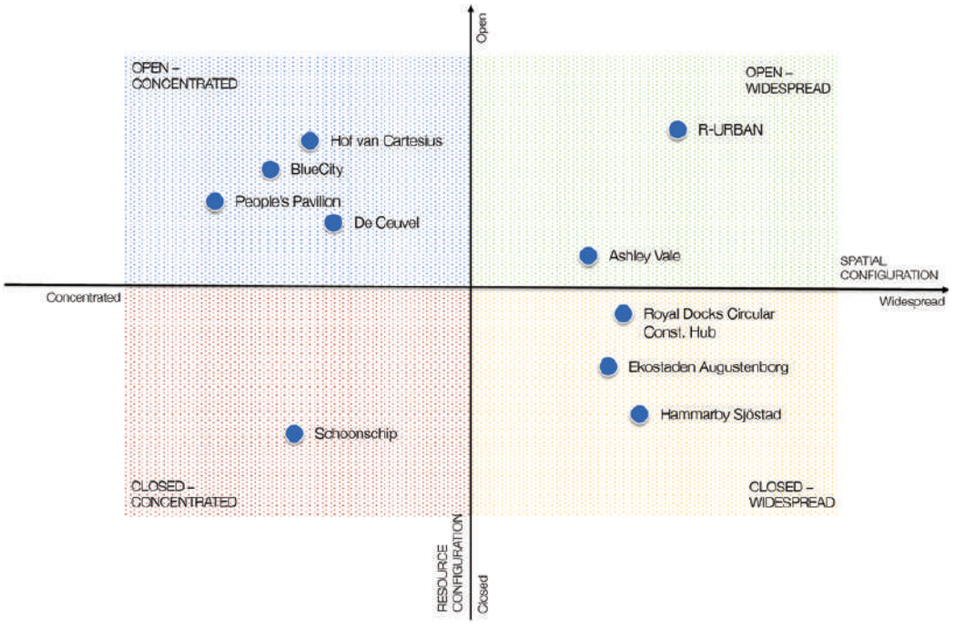


Fig. 18 | Cartesian diagram positioning the analysed socio-circular ecosystem case studies according to the two complementary dimensions: the spatial configuration – x axis, from concentrated to widespread; the resource-sharing approach – y axis, from closed to hybrid and open, based on the analysis of the governance and sharing of the six resources K, S, SV, M, E, and W (credit: the Authors, 2025).

atives and condominium agreements), with common rules for maintenance and cost sharing;
– Self- and externally produced and shared internally (hybrid approach); energy is produced partly internally (e.g., photovoltaic systems and small-scale cogeneration) and partly by external suppliers; energy is shared internally through common infrastructure and collective agreements; residents and users are connected to the same systems and can jointly negotiate rates and select external suppliers;
– Self-produced and shared externally (open approach); the excess energy produced within the ecosystem (local generation, storage) is distributed outside (district), creating extended energy communities.

For the category 'Water' (W; Fig. 7)[9], potable water for hygiene is assumed to be provided by the municipal water supply network, while circular strategies focus mainly on non-potable uses (sanitary water, cleaning, and irrigation) and rainwater management:
– Self-produced and shared internally (closed approach); water for non-potable community uses is collected, managed, and reused internally (rainwater harvesting, storage); governance is typically entrusted to a cooperative, condominium, association, or management company that makes decisions on the design, maintenance, and allocation of costs;
– Self- and externally produced and shared internally (hybrid approach); water for non-potable uses is only partially produced internally, through the implementation of collection and reuse strategies, and is supplied mainly by the municipality;
– Self- and externally produced and internally / externally shared (open approach); water systems are internally optimised while being functionally integrated into larger territorial infrastructures (neighbourhood or district).

Application of the proposed interpretative framework to case studies | The proposed interpretative framework for the Socio-Circular Ecosystem is applied to a sample of significant case studies. The following selection criteria were considered for the choice of cases:
– Conceptual fit; each case combines circular strategies with an explicit purpose of social innovation, overcoming the vision of circularity as a purely environmental or technical goal;
– Data availability; each case is documented through reports, interviews, and direct observation and has already been implemented in a real context;
– Geographical context; all projects are located in European urban contexts, ensuring a certain degree of comparability in terms of regulatory frameworks and welfare systems.

In defining the sample, the diversity of settlements was also taken into consideration; the selected cases therefore cover different scales (building, block, neighbourhood) and different types of settlement (former industrial areas, housing, and mixed-use hubs) and initiative (public, private and community). Ten cases have been identified: Hof van Cartesius (Utrecht, Netherlands); De Ceuvel (Amsterdam, Netherlands); Schoonschip (Amsterdam, Netherlands); People's Pavilion (Eindhoven, Netherlands); BlueCity (Rotterdam, Netherlands); R-URBAN (Colombes, France); Royal Docks Circular Construction Hub (London, UK); Ashley Vale (Bristol, United Kingdom); Hammarby Sjöstad (Stockholm, Sweden); and Ekostaden Augustenborg (Malmö, Sweden).

An initial analysis aimed to provide an overview of the main information for each case study, including: location, year of opening, size, main uses, ownership and management (relating to land, buildings, and services), funding sources, and the economic model (Tab. 4)[10]. The second phase of analysis concerns mapping the flows of the six resource categories to identify the approaches (closed, hybrid, and open). As an example, Table 5 presents the analysis carried out on the Hof van Cartesius project (Figg. 8-17). The same analytical procedure was applied to all ten case studies (Tab. 6).

Hof van Cartesius can be read as an open SCE. In particular, the 'Information, knowledge and competences' category combines the K1 (closed) and K3 (open) approaches: internal know-how is shared mainly within the community following a team-based organisation, while workshops, guided tours, and participation in circular networks open this knowledge outward. 'Spaces' present diversified approaches, from closed access (S1) of the private ateliers to the hybrid approach (S2) of the shared courtyard and garden, and to the open approach (S3) of the spaces dedicated to events and community activities. 'Services' represent the most open-oriented dimension, combining closed (SV1), hybrid (SV2) and especially open (SV3) approaches, as internal voluntary activities coexist with public workshops, festivals, guided tours, and community-oriented initiatives.

'Materials and products' are predominantly hybrid (M2), as the construction is mainly based on reused and bio-based materials from external reuse networks, while there are also internal exchanges (M1, closed system) and redistribution to the outside via reuse hubs (M3, open system). In contrast, 'Energy' (E1, closed system) and 'Water' (W1, closed system) are managed internally through local systems and collective agreements. Overall, Hof van Cartesius demonstrates how a physically delimited place can generate broader social value through the selective sharing of specific resources (in particular knowledge, spaces, and services) with the surrounding neighbourhood and city.

Critical discussion and results of the implementation of the interpretative framework based on the Socio-Circular Ecosystem | The analysis of the case studies through the Socio-Circular Ecosystem model has first made it possible to identify new links between circularity and social effects: community-based organisational models (the joint initiative of entrepreneurs and builders at Hof van Cartesius), new ways of managing shared resources (sharing of goods, furniture-repair and clothing-repair networks), community-oriented circular practices (use of local reused materials deriving, for example, from demolition sites or surplus stock

from construction companies), creation of social ties within the community (exchange of knowledge exchange, network-building between small businesses, local economic resilience, community involvement through events and activities open to the public).

Furthermore, the case analysis was integrated with a focus on the spatial dimension of the settlement strategy: each case was analysed within a space-resource diagram (Fig. 18), combining the settlement strategy (space size – from concentrated to widespread) and sharing models (resource size – from closed to open). Although the 'open' approach of the resource-sharing model combined with the 'geographically distributed' settlement strategy (e.g., R-Urban, Ashley Vale) seems to represent the optimal case to maximise the overall potential (e.g., public engagement) and value (including social value) of the circular project, it is possible to identify two recurring spatial-organisational strategies.

An approach of 'open' sharing and geographically concentrated design. In this case, the open approach to resource sharing serves as a facilitator of external interactions among geographically concentrated projects. According to this approach, some case studies (Hof van Cartesius, De Ceuvel, BlueCity, and the People's Pavilion) operate as geographically concentrated centres (buildings) within a wider spatial network of open ecosystems. These realities are often characterised by the presence of shared spaces, collaborative services and community-oriented activities; their open character is manifested through accessibility, cultural programming, knowledge exchange, and experimentation, but their geographical footprint remains relatively limited. In this approach, circularity implies an intense social interaction between different projects (at the building scale) within a delimited geographical dimension (district). A 'closed' approach to resource sharing and geographically distributed design. In this case, the district and territorial scales act as a generator of positive externalities for the community. In projects that operate on a larger scale (district and city – Hammarby Sjöstad, Ekostaden Augustenborg), the resource management (energy, water, materials, and waste) is mainly handled by the municipalities (the Royal Docks Circular Construction Hub) rather than by the community itself. However, residents or users benefit from physical systems (mainly infrastructure), but do not manage them directly. In these cases, circularity is pursued mainly through infrastructure solutions, while smaller hubs are more effective in activating participatory practices and shared management of resources.

Conclusions and future developments | The concept of Socio-Circular Ecosystem proposes a new point of view on the already widespread realities of 'circular ecosystems' by emphasising the importance of the social dimension and helping to fill a gap in the literature relating to the repercussions of circularity for the community – in line with Sustainable Development Goals (SDGs) 9, 10, 11, and 12, on which the contribution can have direct and verifiable benefits; it is also believed that there may be an indirect impact with respect to SDGs 1, 2, 3, 4, 6, 7, 8, and 13, which are linked to the six categories of resources identified in the interpretative scheme.

The proposed scheme supports the analysis of circular economy initiatives, in particular: a) it provides a model of interpretation that supports the understanding of circular initiatives and highlights their potential in terms of social innovation; b) it makes it possible to recognise how resources are produced, shared, and governed within an ecosystem, facilitating the comparison between different initiatives implemented at different scales of application; c) it highlights the role of collaborative governance models and collective practices in SCEs; d) it contributes to highlighting the social innovation incorporated in circular strategies by linking it to experimentation with experimental settlement, use, and housing models.

Limitations to the applicability of the proposed scheme must be verified in relation to the availability and transparency of data, in particular those relating to intangible resources such as knowledge, skills and services. As far as replicability and transferability are concerned, the proposed interpretative scheme can be applied to different scales (building, neighbourhood, city, territory), in different use-related, social, and cultural contexts characterised by sharing of resources (social housing, public housing, living labs, co-working, co-living, hoteling, franchising, etc.).

Future developments should aim to expand and refine the sample of cases analysed, which in this study focused on northern European countries, for which there are consolidated practices of sharing resources. In order to further test the robustness of the interpretative scheme in the reading of different geographical contexts, types of settlements and governance structures, future developments should include an extension of the sample across different countries. Another aspect concerns the definition of criteria for determining the boundaries of the SCEs in order to assess their areas of influence even beyond the system's physical boundaries. Finally, the involvement of experts from social disciplines appears relevant, in order to refine the analysis of social innovation, also with respect to aspects related to participation, social cohesion, access to resources and the long-term evolution of communities.

Acknowledgements

This paper presents the partial results of ongoing doctoral research at the Department of Architecture, Built Environment and Construction Engineering (DABC) of the Politecnico di Milano.

Notes

1) In the Circular Economy transition, the building sector represents a determining area of action due to its substantial environmental footprint: in Europe, it accounts for 33% of energy-related greenhouse gas emissions (EEA, 2024) and 38.4% of total waste generation. For more information on Eurostat 2024 statistics, please visit the webpage.: ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Waste_statistics#Total_waste_generation [Accessed 10 March 2026].

2) In particular, the social dimension in this paper is developed in terms of social innovation, i.e. the development of new practices, services, organisational models or governance arrangements that address social needs while generating new forms of collaboration and social value (Milotay, 2017).

3) By allowing multiple users to access the same assets over time, sharing increases utilisation rates, extends the useful life of products, buildings and infrastructure, postpones the need for new production (Kjær et alii, 2019; Tukker, 2015), and reduces the demand for primary raw materials (Aldieri et alii, 2021). In this sense, sharing contributes directly to circular economy goals by optimising the use of existing resources rather than focusing only on end-of-life strategies such as recycling (Henry et alii, 2021). The sharing strategy, if implemented in practice, requires a circular ecosystem approach because it cannot be implemented by a single actor, nor reduced to a simple provider-user dynamic. It involves multiple interdependent roles. Abdalla, Amankwah-Amoah and Badewi (2023) identify primary (new and current customers, product and service providers; and small, medium, and large mediators) and secondary participants (local and national governments), while Leung, Xue and Wen (2019) lists as participants the platform, the provider, the consumer, the competitor, the partner, the government, and the community. Moreover, the sharing practice raises specific ecosystem-related requirements that extend beyond any single firm or project: alignment of interests, roles, and responsibilities across all participants (Leung, Xue and Wen, 2019). Thus, each player needs to pursue its own goals without harming others' interests.

4) The closed approach in relation to the 'Knowledge' category can be recognised in Ashley Vale in Bristol (Broer and Titheridge, 2010), where practical know-how was largely developed through the residents' own self-build process and internal organisation. The hybrid approach can be recognised in cases such as Hof van Cartesius (European Commission, n.d.), where a bottom-up cooperative of makers and entrepreneurs developed the project while also relying on collaboration with contractors and external expertise. Lastly, the open approach is particularly evident in De Ceuvel in Amsterdam (Williams, 2023), where guided visits, workshops and events are periodically organised with the goal of sharing knowledge among internal and external stakeholders.

5) The closed approach in relation to 'Spaces' can be recognised, for example, in Ashley Vale (Bristol), where the dwellings created through the self-build process remain primarily under the control of the individual households, and in the private ateliers or work units of projects such as Hof van Cartesius (Utrecht), which are assigned to specific makers or entrepreneurs. The hybrid approach is clearly recognisable in cases such as De Ceuvel (Amsterdam), which includes creative workspaces and common venues that support a community of circular and creative entrepreneurs – spaces are mainly used by the members; however, some of them are occasionally accessible to external users. Lastly, BlueCity (Rotterdam), which combines workspaces with event spaces and programmes addressed to broader urban audiences, is a representative case of the open approach (European Commission, 2017).

6) Closed approaches of the resource category 'Services' can be observed in projects such as Ashley Vale, where residents collectively organise services and mutual-support practices, or in cooperative communities like Schoonschip in Amsterdam (Cutieru, 2021), where shared services are primarily

designed to support internal households. Hybrid approaches, instead, can be observed in initiatives such as De Ceuvel, where creative workspaces and services operate within the project while attracting external visitors, and Hof van Cartesius, where ateliers, workshops and professional services are run by resident entrepreneurs but accessible to broader audiences. Elements of the open approach are recognisable in initiatives such as BlueCity, which offers incubation programmes, events and training on circular economy for external actors, and R-Urban in Colombes (Petrescu, Petcou and Baibarac, 2016), where services such as urban agriculture, repair activities and educational programmes are oriented towards the surrounding community.

7) In relation to the resource category 'Materials and products', elements of a closed approach can be found in Schoonschip (Amsterdam), where residents share electric cars and bicycles within the neighbourhood. The hybrid approach can be recognised in De Ceuvel, where salvaged houseboats and recycled materials were transformed into workspaces for the internal community. Lastly, the open approach is particularly evident in R-Urban or Royal Docks Circular Construction Hub in London (Greater London Authority, 2026), where reused materials collected from surrounding construction sites are stored, transformed and recirculated through a wider local reuse system, and in the People's Pavilion (Eindhoven) (Halleran and Waldstrom, 2017), whose materials were borrowed from external suppliers and returned after use, demonstrating how material flows can be organised across project boundaries rather than retained within a single site.

8) Examples of the closed approach of the resource category 'Energy' are recognisable in the case Schoonschip in Amsterdam, where the houses generate electricity through photovoltaic panels, use heat pumps and exchange electricity through an internal smart grid, or De Ceuvel, where energy flows are partly managed through on-site renewable systems and internal optimisation strategies. The hybrid approach can be recognised in Schoonschip, where photovoltaic production and battery storage are combined with a single connection to the national electricity grid, and in Hof van Cartesius, where locally generated solar energy complements electricity supplied through the conventional grid while supporting a community of circular entrepreneurs. Lastly, the open approach can be recognised in district-scale systems such as Hammarby Sjöstad in Stockholm (Iverot and Brandt, 2011), where buildings are connected to Stockholm's broader district heating and cooling networks.

9) Examples of the closed approach in relation to the resource category 'Water' can be recognised in the case of Vätterhem YEAH in Jönköping, described as fully off-grid public rental housing using rainwater harvesting and greywater processing (HEH, n.d.), and Patch22 in Amsterdam, where rainwater collection feeds a greywater system within the building (Frantzen, 2015). An example of the hybrid approach can be recognised in the Schoonschip case, where the houses combine a central clean-water supply with internal water innovations, including shower-water reuse, while black water is still discharged to the sewer; another relevant precedent is De Ceuvel, where the houseboats use conventional drinking water but treat greywater locally through individual biofilters and composting-based sanitation systems. Lastly, examples of the open approach can be recognised in Ekostaden Augustenborg in Malmö (EEA, 2017), where open stormwater infrastructures mitigate flooding and contribute to neighbourhood resilience, Hammarby Sjöstad, where local water management is integrated into a wider urban eco-cycle system, and Seestadt Aspern in Vienna (Williams, 2023), where rainwater retention and blue–green infrastructures support climate adaptation at district scale. In such cases, the ecosystem operates as a node within the urban water system, requiring new forms of coordination, co-governance and collective responsibility between the local community and public authorities.

10) The acronyms used in Table 4 are the following. Settlement type: BLD = building; NBHD = neighbourhood; DIST = District; NET = network. Development type: NEW = new development; REG = regeneration of existing asset. Initiative type: PUB = municipality or public institutions; PRIV = private entities; CIV = civic actor (cooperative, NGO); PUB-PRIV = Public–private partnership. Main uses: RES = Residential; WSP = Workspaces; EXH=exhibitions; AGR = Urban agriculture; HUB = central facility. Ownership / Management: PUB = Public; PRIV = Private; CLT = Community Land Trust; COOP = Cooperative; NGO = Non-governmental organisation; NPO = Non-profit organisation. Funding sources: GRANT = Public grants; EU = European funds; LOAN = Bank loans or other debt; INV = Private investment; CROWD = Crowdfunding; SELF = Self-financing. Economic management model: RENT = Rents and leases; MEM = Memberships, dues and participation fees; SERV = Paid services; EVENT = Income from events and programming; SUB = Subsidies and public support.

References

Aarikka-Stenroos, L., Ritala, P. and Thomas, L. D. W. (2021), "Circular economy ecosystems – A typology, definitions, and implications", in Teerikangas, S., Onkila, T., Koistinen, K. and Mäkelä, M. (eds), *Research Handbook of Sustainability Agency*, Edward Elgar Publishing, Cheltenham, pp. 260-276. [Online] Available at: doi.org/10.4337/9781789906035.00024 [Accessed 10 March 2026].

Abdalla, S., Amankwah-Amoah, J. and Badewi, A. (2023), "Sharing-Economy Ecosystem – A Comprehensive Review and Future Research Directions", in *Sustainability*, vol. 15, issue 3, article 2145, pp. 1-15. [Online] Available at: doi.org/10.3390/su15032145 [Accessed 10 March 2026].

Aldieri, L., Brahmi, M., Bruno, B. and Vinci, C. P. (2021), "Circular Economy Business Models – The Complementarities with Sharing Economy and Eco-Innovations Investments", in *Sustainability*, vol. 13, issue 22, article 12438, pp. 1-13. [Online] Available at: doi.org/10.3390/su132212438 [Accessed 10 March 2026].

Aminoff, A., Valkokari, K., Antikainen, M. and Kettunen, O. (2017), "Exploring disruptive business model innovation for the circular economy", in Campana, G., Howlett, R., Setchi, R. and Cimatti, B. (eds), *Sustainable Design and Manufacturing 2017 – SDM 2017 – Selected Papers on Sustainable Design and Manufacturing, University of Bologna, Bologna, Italy, April 26-28, 2017*, Smart Innovation, Systems and Technologies, vol. 68, Springer, Cham, pp. 525-536. [Online] Available at: doi.org/10.1007/978-3-319-57078-5_50 [Accessed 10 March 2025].

Arquilla, V. and Caruso, C. (2025), "Un approccio di integrazione nativa dell'inclusione nel meta-design – L'esperienza COmeta | Towards native integration of inclusivity in meta-design – The COmeta experience", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 17, pp. 360-373. [Online] Available at: doi.org/10.69143/2464-9309/17252025 [Accessed 10 March 2026].

Aryee, R. (2024), "Conceptualising the Circular Ecosystem – An Analysis of Multiple Definitions", in *Business Strategy & Development*, vol. 7, issue 4, article e70050, pp. 1-17. [Online] Available at: doi.org/10.1002/bsd2.70050 [Accessed 10 March 2026].

Asgari, A. and Asgari, R. (2021), "How circular economy transforms business models in a transition towards circular ecosystem – The barriers and incentives", in *Sustainable Production and Consumption*, vol. 28, pp. 566-579. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.spc.2021.06.020 [Accessed 10 March 2026].

Atstaja, D., Koval, V., Grasis, J., Kalina, I., Kryshtal, H. and Mikhno, I. (2022), "Sharing Model in Circular Economy towards Rational Use in Sustainable Production", in *Energies*, vol. 15, issue 3, article 939, pp. 1-26. [Online] Available at: doi.org/10.3390/en15030939 [Accessed 10 March 2026].

Barquete, S., Shimozono, A. H., Trevisan, A. H., Castro, C. G., Gomes, L. A. V. and Mascarenhas, J. (2022), "Exploring the dynamic of a circular ecosystem – A case study about drivers and barriers", in *Sustainability*, vol. 14, issue 13, article 7875, pp. 1-22. [Online] Available at: doi.org/10.3390/su14137875 [Accessed 10 March 2026].

Bocken, N. M. P., de Pauw, I., Bakker, C. and Van der Grinten, B. (2016), "Product design and business model strategies for a circular economy", in *Journal of Industrial and Production Engineering*, vol. 33, issue 5, pp. 308-320. [Online] Available at: doi.org/10.1080/21681015.2016.1172124 [Accessed 10 March 2026].

Broer, S. and Titheridge, H. (2010), "Eco-Self-Build Housing Communities – Are They Feasible and Can They Lead to Sustainable and Low Carbon Lifestyles?", in *Sustainability*, vol. 2, issue 7, pp. 2084-2116. [Online] Available at: doi.org/10.3390/su2072084 [Accessed 10 March 2026].

Bullinger, K. (2025), "An institutional theory perspective on social innovations for a circular built environment", in *Urban, Planning and Transport Research*, vol. 13, issue 1, article 2534351, pp. 1-21. [Online] Available at: doi.org/10.1080/21650020.2025.2534351 [Accessed 10 March 2026].

Bullinger, K. and Schiller, G. (2025), "Social innovations for a circular built environment – A heuristic framework based on a review", in *PLOS | Sustainability and Transformation*, vol. 4, issue 3, article e0000161, pp. 1-22. [Online] Available at: doi.org/10.1371/journal.pstr.0000161 [Accessed 10 March 2026].

Campagnaro, C., Ronsivalle, D., Di Prima, N., Curtabbi, G. and Passaro, R. (2025), "Fare e rifare – Opportunità e limiti della co-progettazione per gli spazi pubblici e di welfare | Doing and redoing – Opportunities and limits of co-design for public and welfare spaces", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 17, pp. 310-323. [Online] Available at: doi.org/10.69143/2464-9309/17212025 [Accessed 10 March 2026].

Carreño-Ortiz, J., Escobar-Sierra, M. and Lopez-Perez, F. (2025), "Theoretical relationship between circular economy and social innovation from a sustainable development perspective", in *Humanities and Social Sciences Communications*, vol. 12, article 1549, pp. 1-20. [Online] Available at: doi.org/10.1057/s41599-025-05862-0 [Accessed 10 March 2026].

Crippa, D., Di Prete, B., Fagnoni, R. and Leonardi, C. (2024), "Distretti energetici collaborativi – Laboratori urbani per un'energia di prossimità | Collaborative energy districts – Urban workshops for proximity energy", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 15, pp. 296-305. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/15242024 [Accessed 10 March 2026].

Cutieru, A. (2021), "Amsterdam's Floating Neighbourhood Schoonschip Offers a New Perspective on Circularity and Resiliency", in *ArchDaily*, 28/06/2021. [Online] Available at: archdaily.com/964050/amsterdams-floating-neighbourhood-schoonschip-offers-a-new-perspective-on-circularity-and-resiliency [Accessed 10 March 2026].

Del Curto, B., Valassina, S. and Santi, R. (2025), "Materiali pro-sociali – Modelli sostenibili alimentati da un'istruzione di qualità | Pro-social materials – Sustainable models powered by quality education", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 17, pp. 374-383. [Online] Available at: doi.org/10.69143/2464-9309/17262025 [Accessed 10 March 2026].

EEA – European Environment Agency (2024), *Greenhouse gas emissions from energy use in buildings in Europe*. [Online] Available at: eea.europa.eu/en/analysis/indicators/greenhouse-gas-emissions-from-energy [Accessed 15 February 2026].

EEA – European Environment Agency (2017), "Urban stormwater management in Augustenborg, Malmö", in *Climate-ADAPT*, 27/06/2017. [Online] Available at: climate-adapt.eea.europa.eu/en/metadata/case-studies/urban-stormwater-management-in-augustenborg-malmo [Accessed 10 March 2026].

Eixerés Ros, J. (2025), "Habitat collettivi per la rigenerazione rurale – Una cooperativa edilizia ad Almenara (Spagna) | Collective habitats for rural regeneration – A housing cooperative in Almenara (Spain)", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 18, pp. 238-249. [Online] Available at: doi.org/10.69143/2464-9309/18132025 [Accessed 10 March 2025].

European Commission (2017), "BlueCity revitalises abandoned Rotterdam water park into circular laboratory", in *European Circular Economy Stakeholder Platform*. [Online] Available at: circulareconomy.europa.eu/platform/en/goo

d-practices/bluecity-revitalises-abandoned-rotterdam-water-park-circular-laboratory [Accessed 10 March 2026].

European Commission (n.d.), "Het Hof van Cartesius – The circular hotspot for circular action", in *European Circular Economy Stakeholder Platform*. [Online] Available at: circulareconomy.europa.eu/platform/en/good-practices/het-hof-van-cartesius-circular-hotspot-circular-action [Accessed 10 March 2026].

Frantzen, T. (2015), "PATCH22 – Highrise in wood", in *Proceedings of the 8th European Conference on Energy Efficiency and Sustainability in Architecture and Planning*, pp. 1-8. [Online] Available at: events.forum-holzbau.com/pdf/30_EBH_15_Frantzen.pdf [Accessed 10 March 2026].

Frischmann, B. M. (2012), *Infrastructure – The Social Value of Shared Resources*, Oxford University Press, New York. [Online] Available at: doi.org/10.1093/acprof:oso/9780199895656.001.0001 [Accessed 10 March 2026].

Gaddi, R. and Mastrolonardo, L. (2024), "Micro-reti locali per la transizione verde della filiera della lana | Local micro-networks for green transition of the wool supply chain", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 15, pp. 344-353. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/15292024 [Accessed 10 March 2026].

Geissdoerfer, M., Kanda, W. and Kirchherr, J. (2025), "Conceptualizing circular ecosystems – An analysis of 45 definitions", in *Business Strategy and the Environment*, vol. 35, issue 2, pp. 2368-2394. [Online] Available at: doi.org/10.1002/bse.70242 [Accessed 10 March 2026].

Geissdoerfer, M., Savaget, P., Bocken, N. M. P. and Hultink, E. J. (2017), "The circular economy – A new sustainability paradigm?", in *Journal of Cleaner Production*, vol. 143, pp. 757-768. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.048 [Accessed 10 March 2026].

Gkatzogias, K., Romano, E. and Negro, P. (eds) (2024), *A practical guide to the New European Bauhaus self-assessment method and tool*, Publications Office of the European Union, Luxembourg. [Online] Available at: doi.org/10.2760/9581060 [Accessed 10 March 2026].

Gomes, L. A. V., de Faria, A. M., Braz, A. C., de Mello, A. M., Borini, F. M. and Ometto, A. R. (2023), "Circular ecosystem management – Orchestrating ecosystem value proposition and configuration", in *International Journal of Production Economics*, vol. 256, article 108725, pp. 1-16. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.ijpe.2022.108725 [Accessed 10 March 2026].

Greater London Authority (2026), *UK's first Circular Construction Hub launches in the Royal Docks, supporting Mayor's ambition for London to be zero carbon by 2030*. [Online] Available at: london.gov.uk/uks-first-circular-construction-hub-launches-royal-docks-supporting-mayors-ambition-london-be-zero [Accessed 10 March 2026].

Halleran, A. and Waldstrom, E. (2017), "People's Pavilion", in *Circular Design Atlas*. [Online] Available at: fileli st.tudelft.nl/BK/Onderzoek/Onderzoeksthemas/Circular_Built_Environment/Circular_Impuls_Initiative/Circular_Design_Atlas/Atlas_BES2023_Peoples_Pavilion.pdf [Accessed 10 March 2026].

Henry, M., Schraven, D., Bocken, N., Frenken, K., Hekkert, M. and Kirchherr, J. (2021), "The battle of the buzzwords – A comparative review of the circular economy and the sharing economy concepts", in *Environmental Innovation and Societal Transitions*, vol. 38, pp. 1-21. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.eist.2020.10.008 [Accessed 10 March 2026].

Iverot, S. P. and Brandt, N. (2011), "The development of a sustainable urban district in Hammarby Sjöstad, Stockholm, Sweden?", in *Environment, Development and Sustainability*, vol. 13, issue 6, pp. 1043-1064. [Online] Available at: doi.org/10.1007/s10668-011-9304-x [Accessed 10 March 2026].

Kanda, W. (2023), "Systems and ecosystems in the circular economy – What's the difference?", in *Journal of Circular Economy*, vol. 1, issue 3, pp. 1-10. [Online] Available at: doi.org/10.55845/RMDN3752 [Accessed 10 March 2026].

Katrini, E. (2018), "Sharing Culture – On definitions, values, and emergence", in *The Sociological Review Monographs*, vol. 66, issue 2, pp. 425-446. [Online] Available at: doi.org/10.1177/0038026118758550 [Accessed 10 March 2026].

Kenter, J. O., O'Brien, L., Hockley, N., Ravenscroft, N., Fazey, I., Irvine, K. N., Reed, M. S., Christie, M., Brady, E., Bryce, R., Church, A., Cooper, N., Davies, A., Evely, A., Everard, M., Fish, R., Fisher, J. A., Jobstvogt, N., Molloy, C., Orchard-Webb, J., Ranger, S., Ryan, M., Watson, V. and Williams, S. (2015), "What are shared and social values of ecosystems?", in *Ecological Economics*, vol. 111, pp. 86-99. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.ecolecon.2015.01.006 [Accessed 10 March 2026].

Khadim, N., Agliata, R., Marino, A., Thaheem, M. J. and Mollo, L. (2022), "Critical review of nano and micro-level building circularity indicators and frameworks", in *Journal of Cleaner Production*, vol. 357, article 131859, pp. 1-14. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131859 [Accessed 10 March 2026].

Kjaer, L. L., Pigosso, D. C. A., Niero, M., Bech, N. M. and McAloone, T. C. (2019), "Product/Service-Systems for a Circular Economy – The Route to Decoupling Economic Growth from Resource Consumption?", in *Journal of Industrial Ecology*, vol. 23, issue 1, pp. 22-35. [Online] Available at: doi.org/10.1111/jiec.12747 [Accessed 10 March 2026].

Leung, X. Y., Xue, L. and Wen, H. (2019), "Framing the sharing economy – Toward a sustainable ecosystem", in *Tourism Management*, vol. 71, pp. 44-53. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.tourman.2018.09.021 [Accessed 10 March 2026].

Marchesi, M. and Tweed, C. (2021), "Social innovation for a circular economy in social housing", in *Sustainable Cities and Society*, vol. 71, article 102925, pp. 1-17. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.scs.2021.102925 [Accessed 10 March 2026].

Marchesi, M., Tweed, C. and Gerber, D. (2020), "Applying Circular Economy Principles to Urban Housing", in Wallbaum, H., Hollberg, A. and Thuvander, L. (eds), *WSBE 20 – World Sustainable Built Environment – Beyond2020, Gothenburg, Sweden, November 2-4, 2020*, IOP Conference Series – Earth and Environmental Science, IOP Publishing, Bristol, vol. 588, article 052065, pp. 1-8. [Online] Available at: doi.org/10.1088/1755-1315/588/5/052065 [Accessed 10 March 2026].

Milotay, N. (2017), *Fostering social innovation in the European Union*, Briefing January 2017, European Parliament, Brussels. [Online] Available at: europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2017/595885/EPRS_BRI(2017)595885_EN.pdf [Accessed 8 March 2026].

Moggi, S. and Dameri, R. P. (2021), "Circular business model evolution – Stakeholder matters for a self-sufficient ecosystem", in *Business Strategy and the Environment*, vol. 30, issue 6, pp. 2830-2842. [Online] Available at: doi.org/10.1002/bse.2716 [Accessed 10 March 2026].

Mont, O. and Voytenko Palgan, Y. (2025), "Introduction to Understanding the Urban Sharing Economy", in Mont, O. (ed.), *Understanding the Urban Sharing Economy – Sustainability and Institutionalisation*, Edward Elgar Publishing, Cheltenham, pp. 2-23. [Online] Available at: doi.org/10.4337/9781035320547.00010 [Accessed 10 March 2026].

Olivastri, C. and Tagliasco, G. (2024), "Servizi per il riuso e il riparo – L'allestimento tra touchpoints e infrastrutture relazionali | Services for reuse and repair – The arrangement between touchpoints and relational infrastructures", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 15, pp. 324-331. [Online] Available at: doi. org/10.19229/2464-9309/15272024 [Accessed 10 March 2026].

Pérez-Pérez, C. and Nebreda-Calvo, R. (2024), "The Value Creation Model in the Sharing Economy", in González-Torres, T. and Rodríguez-Sánchez, J.-L. (eds), *Promoting Value Creation Through Organizational Effectiveness and Development*, IGI Global Scientific Publishing, Hershey, pp. 1-20. [Online] Available at: doi.org/10.4018/978-1-6684-8479-1.ch001 [Accessed 10 March 2026].

Petrescu, D., Petcou, C. and Baibarac, C. (2016), "Co-producing commons-based resilience – Lessons from R-Urban", in *Building Research & Information*, vol. 44, issue 7, pp. 717-736. [Online] Available at: doi.org/10.1080/09613218.2016.1214891 [Accessed 10 March 2026].

Pietrulla, F. (2022), "Circular ecosystems – A review", in *Cleaner and Circular Bioeconomy*, vol. 3, article 100031, pp. 1-12. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.clcb.2022.100031 [Accessed 10 March 2026].

Quintelier, K. J. P., van Bommel, K., van Erkelens, A. M. and Wempe, J. (2023), "People at the heart of circularity – A mixed methods study about trade-offs, synergies, and strategies related to circular and social organizing", in *Journal of Cleaner Production*, vol. 387, article 135780, pp. 1-11. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135780 [Accessed 10 March 2026].

Rathnayake, I., Ochoa, J. J., Gu, N., Rameezdeen, R., Statsenko, L. and Sandhu, S. (2024), "A critical review of the key aspects of sharing economy – A systematic literature review and research framework", in *Journal of Cleaner Production*, vol. 434, article 140378, pp. 1-23. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.140378 [Accessed 10 March 2026].

Semprebon, G., Santus, K., Sartorio, S. and Scaioli, A. L. N. (2021), "Progetto ed economia circolare – Architetture che rigenerano il tessuto costruito | Design and circular economy – Architectures that regenerate the built fabric", in *Agathón | International Journal of Architecture Art and Design*, vol. 9, pp. 62-71. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/962021 [Accessed 10 March 2026].

Sica, G., Palazzo, M., Micozzi, A., Gigauri, I., Ključnikov, A. and Lusini, G. (2025), "The role of communities and social innovation in circular economy and sustainable packaging – A bibliometric perspective", in *Cogent Business & Management*, vol. 12, issue 1, article 2583738, pp. 1-30. [Online] Available at: doi.org/10.1080/23311975.2025.2583738 [Accessed 10 March 2026].

Trevisan, A. H., Castro, C. G., Gomes, L. A. V. and Mascarenhas, J. (2022), "Unlocking the circular ecosystem concept – Evolution, current research, and future directions", in *Sustainable Production and Consumption*, vol. 29, pp. 286-298. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.spc.2021.10.020 [Accessed 10 March 2026].

Tukker, A. (2015), "Product services for a resource-efficient and circular economy – A review", in *Journal of Cleaner Production*, vol. 97, pp. 76-91. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.11.049 [Accessed 10 March 2026].

Uusikartano, J., Väyrynen, H. and Aarikka-Stenroos, L. (2020), "Public agency in changing industrial circular economy ecosystems – Roles, modes and structures", in *Sustainability*, vol. 12, issue 23, article 10015, pp. 1-27. [Online] Available at: doi.org/10.3390/su122310015 [Accessed 10 March 2026].

Williams, J. (2023), "Circular cities – Planning for circular development in European cities", in *European Planning Studies*, vol. 31, issue 1, pp. 14-35. [Online] Available at: doi.org/10.1080/09654313.2022.2060707 [Accessed 10 March 2026].

Wurster, S., Heß, P., Nauruschat, M. and Jütting, M. (2020), "Sustainable circular mobility – User-integrated innovation and specifics of electric vehicle owners", in *Sustainability*, vol. 12, issue 19, article 7900, pp. 1-20. [Online] Available at: doi.org/10.3390/su12197900 [Accessed 10 March 2026].

Yu, Y., Yazan, D. M., van den Berg, M., Firdausy, D. R., Junjan, V. and Iacob, M.-E. (2023), "Circularity information platform for the built environment", in *Automation in Construction*, vol. 152, article 104933, pp. 1-17. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.autcon.2023.104933 [Accessed 10 March 2026].

ARCHITECTURE
Research & Experimentation

AGATHÓN – International Journal of Architecture, Art and Design | n. 19 | 2026 | pp. 212-227
ISSN print: 2464-9309 – ISSN online: 2532-683X | doi.org/10.69143/2464-9309/19122026

Article Info

Received 10 March 2026
Revised 13 April 2026
Accepted 15 April 2026
Published 30 June 2026

TRANSIZIONI INTERCONNESSE PER LA SOSTENIBILITÀ INDUSTRIALE
Strumenti digitali, efficienza energetica e circolarità

INTERCONNECTED TRANSITIONS FOR INDUSTRIAL SUSTAINABILITY
Digital tools, energy efficiency, and circularity

Giuseppe Losco, Chiara Pasqualini, Mohammadjavad Khodaparast

Abstract

Il percorso verso modelli industriali sostenibili si fonda sulle sinergie tra le tre transizioni circolare, energetica e digitale. In tale ottica il contributo propone un framework metodologico per la valutazione congiunta delle performance energetiche e di circolarità delle imprese del settore industriale, integrando la diagnosi energetica della serie EN 16247 e la metodologia di misurazione della circolarità definita dalla UNI/TS 11820:2022. Viene adottato un approccio guidato dai dati e basato su sistemi digitali di monitoraggio dei vettori energetici, strumenti di analisi dei dati e modelli di simulazione energetica dinamica. Il framework è applicato al caso studio di uno stabilimento di una grande azienda agroalimentare e i risultati evidenziano come interventi di efficientamento energetico e autoproduzione da fonti rinnovabili producano effetti positivi sia sulle prestazioni energetiche sia sugli indicatori di circolarità.

The path towards sustainable industrial models is based on the synergies between the circular, energy, and digital transitions. In this light, this paper proposes a methodological framework for the joint assessment of energy performance and corporate circularity in the industrial sector, integrating the energy audit set out in the EN 16247 series with the circularity measurement methodology defined by UNI/TS 11820:2022. A data-driven approach is adopted, based on digital monitoring systems for energy carriers, data analysis tools, and dynamic energy simulation models. The framework is applied to a case study of a plant operated by a large agri-food company; the results highlight how energy efficiency measures and self-generation from renewable sources improve both energy performance and circularity indicators.

Keywords

economia circolare, diagnosi energetica, gemello digitale per il settore industriale, simulazione energetica dinamica, decarbonizzazione industriale

circular economy, energy audit, digital twin in the industrial sector, dynamic energy simulation, industrial decarbonisation

Giuseppe Losco, Architect and PhD, is a Full Professor of Industrial Design at the School of Architecture and Design, University of Camerino (Italy). His research focuses on experimental design for new models of sustainable environmental development and new product concepts, addressing issues related to the qualitative development of the built environment, with particular attention to eco-sustainable and energy-efficient materials, as well as energy-saving techniques and technologies. E-mail: giuseppe.losco@unicam.it

Chiara Pasqualini, Architect and PhD in Innovation Design at the SAAD, University of Camerino (Italy), researches energy efficiency in buildings, energy management, circular and renewable energy strategies for communities, digitalisation through BIM, and energy analysis via building modelling. E-mail: chiara.pasqualini@unicam.it

Mohammadjavad Khodaparast, Architect and PhD in Architecture, Design, and Planning at the University of Camerino (Italy), focuses his research primarily on urban sustainability, materials, urban heat island effects, technological innovation, and environmental design. E-mail: javad.khodaparast@unicam.it

Tra gli obiettivi dell'Agenda 2030 (UN, 2015) per lo sviluppo sostenibile emerge la necessità di trasformare i modelli economici e il settore industriale affinché crescita e sviluppo siano disaccoppiati da uno sfruttamento delle risorse che supera la loro capacità di rigenerazione e che limiti gli impatti ambientali in termini di emissioni e rifiuti (UNEP, 2011). Un tale sforzo innovativo dell'industria incide sull'Obiettivo di Sviluppo Sostenibile (SDG) n. 9 dell'Agenda e si dimostra in sinergia con l'SDG n. 7, poiché promuove l'efficienza energetica e l'utilizzo di fonti rinnovabili, con l'SDG n. 12, per l'approdo a modelli di circolarità e uso efficiente delle risorse, e con l'SDG n. 13, perché orientato alla decarbonizzazione e alla riduzione delle emissioni. Affiorano benefici indiretti e alcuni compromessi con l'SDG n. 10 sulla riduzione delle disuguaglianze, poiché se da un lato la transizione verso modelli di economia circolare stimola la domanda di nuove competenze e la revisione delle filiere di approvvigionamento di materiali ed energia a vantaggio dell'occupazione e delle realtà locali (Losco et alii, 2024), dall'altro la dotazione di tecnologie e di strumenti di controllo e gestione è ancora poco diffusa tra le piccole e medie imprese (PMI; Trevisan et alii, 2023).

In coerenza con tali obiettivi la Commissione Europea ha emanato il Green Deal (European Commission, 2019), finalizzato al raggiungimento della neutralità climatica, in cui transizione circolare, transizione energetica e transizione digitale si configurano come leve fondamentali (Fig. 1). La transizione circolare, orientata alla chiusura dei cicli (EMF, 2013), alla riduzione degli sprechi e alla conservazione del valore di prodotti, componenti e materiali (Paganin et alii, 2024), si integra con la transizione energetica, finalizzata alla decarbonizzazione attraverso l'efficienza energetica e l'affrancamento dalle fonti fossili. Le due traiettorie risultano complementari e spesso sostenute da politiche europee che promuovono azioni con impatti positivi su entrambi i fronti, poiché conducono a una minore dipendenza dalle risorse esterne e a una maggiore resilienza del sistema produttivo, con benefici sul piano ambientale e socioeconomico.

In questo contesto la transizione digitale svolge un ruolo abilitante, fornendo strumenti per il monitoraggio, la raccolta, l'analisi e la condivisione dei dati, nonché per la simulazione di scenari futuri, rendendo possibile il controllo delle performance e il supporto alle decisioni strategiche per la gestione sostenibile delle risorse (Rigillo, Galluccio and Paragliola, 2023). La transizione ecologica e quella digitale sono sempre più affrontate con approcci sistemici e processi di innovazione aperta tra diversi stakeholder (Barbero and Ferrulli, 2023).

L'attenzione dell'industria all'ambiente è stimolata da una crescente consapevolezza dei consumatori, dall'introduzione di obblighi normativi, da sistemi di incentivazione e dall'influenza delle politiche comunitarie sui mercati finanziari (European Commission, 2020).

Emerge pertanto con chiarezza l'utilità di costruire un quadro valutativo organico, capace di considerare simultaneamente indicatori energetici e di circolarità, affinché la pianificazione strategica aziendale degli interventi non si limiti alla riduzione dei consumi, ma si estenda alla quantificazione complessiva e sistemica delle performance ambientali dell'organizzazione. In tale ottica il presente studio apporta un contributo al filone di ricerca che indaga sulla combinazione delle metodologie esistenti in materia ambientale, finalizzate a leggere in modo sistemico gli impatti delle attività antropiche (Sposito and De Giovanni, 2023). L'obiettivo è realizzare un framework integrato, tenendo conto della centralità degli strumenti digitali nella transizione verso un'industria più sostenibile.

In tale ottica il presente contributo presenta alcuni risultati di un progetto di ricerca dottorale PON finanziato dal Ministero con risorse FSE REACT-EU su tematiche dell'innovazione, durato tre anni dal 2022 al 2024 e affiancato da una grande azienda multinazionale del settore agroalimentare, che ha avuto un ruolo di supporto per la condivisione dei dati e la redazione di diagnosi energetiche. L'originalità della ricerca risiede nel superamento dell'attuale frammentazione tra gli strumenti di diagnosi energetica e di misurazione della circolarità, attraverso l'integrazione metodologica degli standard UNI CEI EN 16247-1:2022 e UNI/TS 11820:2022 (UNI, 2022a, 2022b), supportata da strumenti digitali e simulativi e nella definizione di un quadro sinottico degli indicatori chiave di prestazione capace di esplicitare le interdipendenze tra transizione energetica e circolare.

Il contributo è rilevante da un punto di vista scientifico perché ottimizza e sistematizza il corredo di indicatori e metodologie a disposizione delle aziende, sperimenta i benefici dell'apporto di strumenti digitali avanzati e, dimostrando gli esiti positivi con l'applicazione sul caso studio di una Grande Impresa, può ispirare le politiche di incentivazione per la replicazione anche nelle PMI, contribuendo ulteriormente all'obiettivo di ridurre le disuguaglianze. Il paper si articola in una prima parte che introduce strategie e strumenti esistenti per la triplice transizione dell'industria, una seconda sezione che argomenta la metodologia adottata per la realizzazione del framework integrato di valutazione, una terza focalizzata sull'applicazione al caso studio, una quarta che riporta una discussione sugli strumenti digitali a supporto della metodologia e una sezione conclusiva che individua limiti e sviluppi futuri.

Strumenti per il controllo delle strategie integrate di decarbonizzazione delle aziende | La letteratura evidenzia che il raggiungimento dei target di decarbonizzazione industriale richiede l'adozione di strategie integrate, con particolare riferimento all'efficienza energetica, all'autoproduzione da fonti rinnovabili (per la maggior parte con sistemi fotovoltaici), alle pratiche di economia circolare e alle soluzioni digitali (The European House Ambrosetti, 2023; Fig. 2). Anche le analisi relative al settore agroalimentare confermano che la combinazione di interventi su approvvigionamento energetico, recupero di calore, innovazione tecnologica, elettrificazione e tecnologie digitali 4.0 produce risparmi energetici e riduzioni emissive più consistenti rispetto ad azioni isolate (Bazzocchi et alii, 2023; Realini et alii, 2017; Gobbi et alii, 2021).

Strumenti e metodologie, riferiti a specifici standard normativi, sono a disposizione delle imprese industriali nella duplice traiettoria di transizione circolare ed energetica e consentono valutazioni efficaci, ma operano in modo parallelo, pur dimostrando un rapporto di complementarità perché basati su un set di dati in parte comune, da cui ricavano i rispettivi KPI d'interesse: la UNI/TS 11820:2022 'Misurazione della circolarità – Metodi ed indicatori per la misurazione dei processi circolari nelle organizzazioni' (UNI, 2022b), in riferimento alla transizione circolare, e la diagnosi energetica disciplinata dal D.Lgs. 102/2014 (Presidente della Repubblica Italiana, 2014) e dalle norme della serie UNI CEI EN 16247:2022 (UNI, 2022a), funzionale alla transizione energetica e obbligatoria nei casi previsti dalla legge.

Tali metodologie, pur nate in ambiti distinti, possono convergere nella costruzione di un sistema integrato di misurazione delle performance energetico-ambientali delle aziende, che necessita di fondarsi su strumenti digitali avanzati capaci di effettuare operazioni accurate di raccolta dei dati su consumi, approvvigionamenti, autoproduzione energetica e produzione della fabbrica, di monitoraggio e, soprattutto, di analisi ed elaborazione. La normativa sulle diagnosi energetiche definisce infatti anche i criteri del monitoraggio, aspetto però non affrontato dalla UNI/TS 11820:2022 (Ministero dello Sviluppo Economico, 2016).

La UNI/TS 11820:2022 definisce un quadro metodologico per la misurazione della circolarità ispirato ai principi del Life Cycle Thinking. È applicabile alle aziende di prodotto, di servizio o miste ed è indipendente dai benchmark settoriali. In coerenza con i principi delle serie ISO 59000:2024 (ISO, 2024) e ISO 14067:2018 (ISO, 2018), essa integra le dimensioni ambientali, sociali ed economiche. Il sistema prevede indicatori suddivisi in sei ambiti, tra cui quello delle risorse energetiche e idriche, oggetto di interesse del presente studio.

Gli indicatori sono classificati in 'core', specifici e premianti, e si basano su KPI che includono, ad esempio, la quota di materie prime rinnovabili sul totale in ingresso, la percentuale di acqua recuperata sul fabbisogno, la frazione di rifiuti differenziati, l'energia elettrica e termica autoprodotta, la carbon footprint del prodotto ed elementi di simbiosi industriale. Il livello di circolarità è un valore percentuale calcolato come media ponderata degli indicatori applicabili all'azienda. Il calcolo può essere disaggregato per categoria, favorendo analisi mirate e rappresentazioni radar. La metodologia richiede preliminarmente la definizione del perimetro di valutazione e la verifica della qualità dei dati in termini di accuratezza, rappresentatività e riproducibilità.

La diagnosi energetica costituisce lo strumento cardine della transizione energetica. Introdotta dalla Direttiva 2012/27/UE (European Parliament and the Council of the European Union, 2012) e recepita dal citato D.Lgs. 102/2014, essa richiede un'analisi sistematica dei flussi energetici, l'individuazione delle inefficienze e la proposta di interventi tecnicamente ed economicamente sostenibili. La metodologia, conforme alla serie UNI CEI EN 16247:2022 (UNI, 2022a), prevede la clusterizzazione delle aziende multisito, la costruzione di uno schema energetico multilivello, la compilazione di una descrizione puntuale degli impianti presenti e delle loro caratteristiche tecniche, la modellazione dei vettori energetici al fine di individuare le aree prioritarie di intervento e il calcolo degli Indicatori di Prestazione Energetica.

I KPI principali sono gli Indici di Prestazione Energetica Generali (Ipg) e Specifici (Ips), espressi come consumi rispetto agli energy driver, quali ad esempio il rapporto tra le tonnellate equivalenti di petrolio (tep) riferito a un certo vettore energetico e le tonnellate di prodotto finito (Fig. 3). Viene inoltre richiesto di individuare gli interventi di efficientamento da effettuare nell'arco di un triennio, individuan-

do gli indicatori economico-finanziari quali il tempo di ritorno dell'investimento, il VAN (Valore Attuale Netto) e TIR (Tasso Interno di Rendimento); inoltre viene richiesto di rendicontare i risultati in termini di risparmio energetico e di costi relativamente alle azioni dichiarate in precedenza e implementate (ENEA, 2021).

I sistemi digitali di monitoraggio rappresentano l'infrastruttura abilitante della transizione digitale e il presupposto per l'affidabilità delle valutazioni delle altre transizioni. Indicatori come lo Smart Readiness Indicator consentono inoltre di valutare il grado di integrazione delle tecnologie digitali negli edifici e il loro contributo alla transizione energetica (Azzalin, 2024), costituendo un supporto strategico allo sviluppo di policy ambientali (Lauria et alii, 2025).

Le Linee Guida ENEA richiedono Piani di monitoraggio permanenti per tutti i vettori energetici utilizzati in azienda e misurazioni capillari delle attività principali e dei servizi ausiliari e generali, con una copertura proporzionata ai consumi di ciascuna area funzionale. Può essere efficace l'adozione di architetture multilivello con 'smart meter' che utilizzano protocolli industriali, quali Profibus e Profinet, comunicanti con sistemi di Supervisory Control And Data Acquisition (SCADA) che consentono l'analisi in tempo reale dei fattori di potenza e dei profili di carico degli impianti, nonché dei superamenti di soglia, e permettono l'archiviazione dei dati con dettaglio anche a livello quartorario. Le possibilità offerte da questi sistemi sono notevoli ai fini gestionali e per gli audit energetici (Fig. 4). Un livello ancora più raffinato di controllo digitale degli asset e dei vettori energetici in tempo reale è costituito dalle piattaforme per il Facility Management BIM-oriented che rendono disponibili in un unico ambiente condiviso tutte le informazioni utili, integrando i diversi sistemi presenti in fabbrica e superandone la gestione 'a silos' separati, in coerenza con il paradigma dell'Industria 4.0, fondato su interconnessione, virtualizzazione e gestione dei processi guidata dai dati (Ministero dello Sviluppo Economico, 2017). Si tratta di piattaforme collaborative che raccolgono dati provenienti da sensori, sistemi SCADA, ERP e MES, quali i flussi energetici, i flussi produttivi, le caratteristiche e lo stato manutentivo degli impianti presenti, nonché gli interventi programmati e svolti, realizzando una federazione di database aggiornati a supporto degli stakeholder operativi e manageriali.

L'integrazione con un modello BIM consente di associare le informazioni agli oggetti virtuali visualizzabili, mentre l'informazione geometrica degli spazi facilita le operazioni di misura nella progettazione di nuovi interventi (Russo Ermolli, 2019). Un tale sistema avanzato di controllo e gestione viene definito 'gemello digitale', e si configura come un modello cyber-fisico della fabbrica dotato di un apparato informativo strutturato e costantemente aggiornato (Green Building Council Italia, 2024; Fig. 5). Si specifica che un'altra parte della letteratura individua con il nome di 'gemello digitale' i modelli geometrici semplificati utilizzati per eseguire simulazioni energetiche dinamiche, poiché sono capaci di connettersi ai sensori e ai sistemi di monitoraggio energetico e ambientale degli spazi fisici cui si riferiscono e, opportunamente calibrati, dimostrano un comportamento energetico coerente con quello dell'edificio reale (Fig. 6).

Nel loro insieme questi strumenti dal forte potenziale sinergico, configurano un sistema che, opportunamente integrato, è capace di misurare in modo oggettivo il grado di maturità di un'organizzazione industriale rispetto alle sfide ambientali, fornendo basi quantitative per il miglioramento continuo e per la rendicontazione ESG. Alla luce delle potenzialità integrative offerte da tali strumenti, il contributo presenta un framework per la realizzazione di un tool avanzato di controllo delle prestazioni energetico-ambientali, a supporto di processi decisionali aziendali complessi e consapevoli, capace di mettere in relazione le performance energetiche e di circolarità, di individuare KPI coerenti, di superare gli approcci settorializzati e di consentire una valutazione sistemica delle interdipendenze tra le due transizioni.

Parte della letteratura affronta il tema della valutazione integrata tra transizione energetica e circolare per gli edifici industriali sotto il profilo del recupero edilizio, utilizzando gli indicatori energetici della UNI/TS 11820:2022 (UNI, 2022b) e citando il digitale come sistema di tracciamento dei flussi materici nell'attività edilizia (Baiani et alii, 2024). Altri autori si sono concentrati sulla realizzazione di gemelli digitali per la realizzazione di percorsi di decarbonizzazione sia alla scala dell'edificio che alla scala del distretto urbano (Longo and Roversi, 2025); altri ancora ne hanno esaminato le applicazioni ai fini dell'efficienza energetica (Ba et alii, 2025), senza introdurre alcun focus sul piano della circolarità. Il presente studio supera l'approccio settoriale dello stato dell'arte e fornisce supporto alla gestione operativa della fabbrica.

Metodologia per la valutazione delle sinergie attraverso il supporto del digitale | La metodologia elaborata per la valutazione combinata delle prestazioni di efficienza energetica e di circolarità e il relativo andamento nel tempo si fonda su un approccio guidato dai dati assicurato da strumenti digitali di diversa tipologia: 1) un sistema di monitoraggio e raccolta dati sui vettori energetici in campo a diversi livelli di dettaglio, dalle utenze finali ai contatori generali dell'energia entrante in stabilimento; 2) un software di analisi ed elaborazione dei dati raccolti; 3) un software di simulazione energetica dinamica per la modellazione della fabbrica e la quantificazione dei fabbisogni energetici e delle relative emissioni climalteranti conseguenti a ipotetici interventi futuri. Di seguito è riportata la metodologia di valutazione adottata. Le prime tre fasi sono state ripetute in due annualità diverse, al fine di effettuare analisi comparative a partire dalla quarta fase.

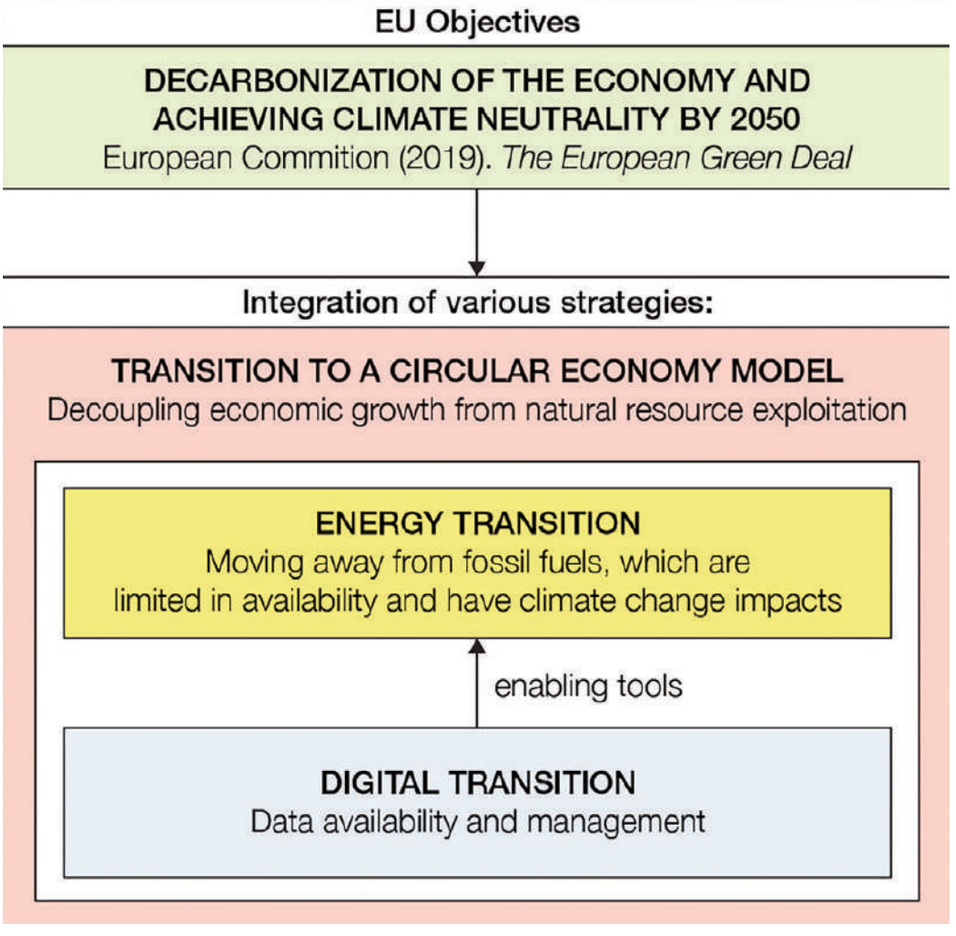


Fig. 1 | Conceptual diagram illustrating the synergies between the circular transition, the energy transition and the digital transition (credit: the Authors, 2025).

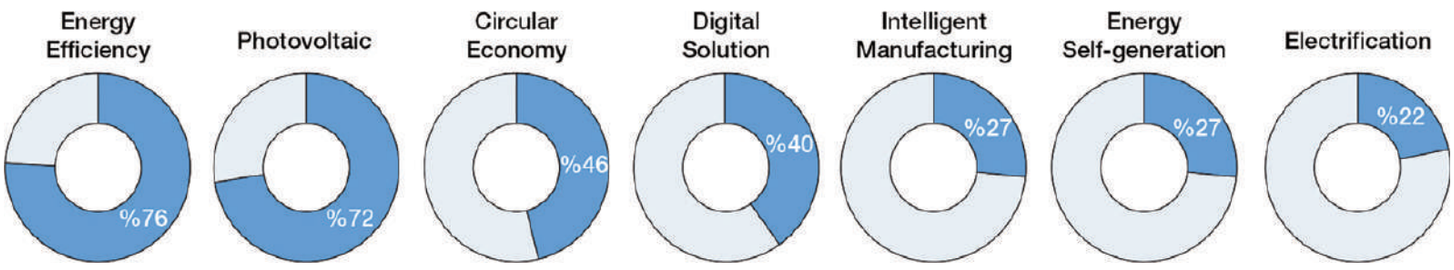


Fig. 2 | Level of awareness among businesses regarding decarbonisation strategies and the energy solutions required to enable them (source: The European House Ambrosetti, 2023).

La prima fase prevede la ricognizione dei dati da raccogliere sui vettori energetici, come previsto dalla normativa sulle diagnosi energetiche, e la loro estrazione dai sistemi digitali di monitoraggio in campo, ai diversi livelli di dettaglio definiti dalla UNI CEI EN 16247:2022 (UNI, 2022a), relativi alla struttura energetica aziendale (ENEA, 2021). Ai fini della replicabilità della metodologia è necessario individuare il confine del sistema, corrispondente al perimetro intero dello stabilimento; i dati da raccogliere per le elaborazioni delle fasi successive riguardano i consumi orari elettrici e termici delle singole linee di produzione, degli impianti appartenenti alla categoria dei servizi ausiliari e di quelli appartenenti ai servizi generali; vanno raccolti anche i dati sull'eventuale autoproduzione energetica e sulla produzione dei beni relativi all'attività aziendale.

La seconda fase prevede la redazione della diagnosi energetica, tramite l'utilizzo di software di analisi per l'aggregazione dei dati e l'individuazione degli indicatori di prestazione, la verifica rispetto ai benchmark indicati dalle Best Available Techniques (Giner Santonja et alii., 2019), l'elaborazione del modello energetico (termico ed elettrico); vanno effettuati anche l'inventario e la descrizione delle caratteristiche tecniche degli impianti, utili nella fase di modellazione e di simulazione energetica dinamica.

È importante quantificare, per ogni vettore energetico, l'energia acquistata da fonti rinnovabili e da fonti fossili, l'eventuale quota acquistata e utilizzata per la trasformazione interna (ad esempio nel caso di cogenerazione), l'energia autoprodotta, la quota autoprodotta consumata internamente (al netto delle eventuali esportazioni) e l'energia consumata rilevata dai contatori 'intelligenti' che, a un livello di aggregazione più alto, deve essere coerente con le letture dei contatori generali. In questa fase si elabora il calcolo dell'efficienza energetica, basato sul KPI relativo al rapporto tra i consumi espressi in tep (tonnellate equivalenti di petrolio) e le tonnellate di prodotto finito. Si specifica che i tep vengono ricavati dalle unità di misura dei vettori energetici, mediante appositi fattori di conversione riportati in letteratura (ENEA, 2021).

La terza fase prevede l'utilizzo dei dati quantitativi, ottenuti con la metodologia di diagnosi energetica, per il calcolo del livello di circolarità dell'azienda, relativo agli indicatori connessi alle risorse energetiche e idriche, secondo la UNI/TS 11820:2022 (UNI, 2022b). Gli indicatori di prestazione richiesti riguardano le strategie di approvvigionamento energetico: autoproduzione, recupero energetico e acquisto da fonti rinnovabili. In particolare vanno calcolati il rapporto tra l'energia elettrica e termica autoprodotta da fonti rinnovabili e/o da processi di recupero rispetto al totale consumato e il rapporto tra l'energia elettrica e termica acquistata da fonti rinnovabili rispetto al totale acquistato. Il livello di circolarità si basa sulla combinazione degli indicatori chiave di prestazione ed è espresso in percentuale (Fig. 7).

La quarta fase si caratterizza per il trasferimento e la lettura dei risultati ottenuti nelle due annualità in una tavola sinottica che, illustrando i risultati delle strategie energetiche, consente di apprezzarne l'andamento nel tempo e di valutare le interconnessioni tra la transizione energetica e circolare, osservando come l'integrazione degli interventi di efficientamento e di approvvigionamento incida sul livello di circolarità.

La quinta fase prevede l'utilizzo di software di simulazione energetica dinamica e la realizzazione di un modello della fabbrica calibrato sui dati energetici orari reali monitorati e raccolti, ai fini della valutazione degli interventi migliorativi. Tale fase è possibile realizzarla previa disponibilità delle informazioni sulle caratteristiche geometriche e costruttive dell'edificio, del layout e delle caratteristiche tecniche degli impianti, riportate nel report di diagnosi energetica (sui dati reali sui consumi energetici raccolti in campo dal sistema di monitoraggio e su file climatici accurati e adeguati).

La sesta fase consiste nell'importare i risultati della simulazione energetica nella tavola sinottica, per valutare i benefici degli interventi ipotizzati su entrambi i fronti della transizione energetica e della transizione circolare.

Il caso di studio di una grande azienda multinazionale del settore agroalimentare | Il caso di studio riguarda uno stabilimento di una grande azienda multisito del settore agroalimentare, dotata di un sistema di monitoraggio robusto che raggiunge il dettaglio quartorario.

I vettori energetici utilizzati sono l'elettricità, che l'azienda acquista per la copertura totale dei fabbisogni attraverso contratti di fornitura con certificazione di Garanzia di Origine da fonti rinnovabili, in particolare quella idroelettrica, e il gas naturale. Non sono ancora stati installati impianti di autoproduzione. Il sistema di monitoraggio è stato oggetto di un recente aggiornamento ed è molto accurato, raggiungendo il livello delle utenze finali e consentendo l'aggregazione dei dati a livello di aree funzionali (linee di produzione, centrale termica, centrale frigorifera, centrale per l'aria compressa, sistema di climatizzazione, magazzino delle materie prime, magazzini dei prodotti finiti e uffici) e di macrocategorie (attività principali, servizi ausiliari e servizi generali).

I dati raccolti hanno riguardato sia i consumi elettrici sia quelli termici; dal software sono stati estratti i quantitativi mensili, effettuando controlli di verifica incrociati con le letture dei contatori in loco e con le bollette. Per alcuni giorni particolari è stato estratto il dettaglio orario, al fine di effettuare successivamente le simulazioni energetiche; inoltre sono stati raccolti, tramite altri software di controllo aziendale della produzione, i dati sui prodotti realizzati, basati su intervalli temporali coerenti con i dati energetici.

È stata condotta una diagnosi energetica completa, inviata in seguito ad ENEA attraverso il portale dedicato, compilando un apposito file di riepilogo in cui sono stati riportati per l'intera annualità i dati dei diversi vettori energetici: 1) i consumi in kWh elettrici e Smc di gas di tutte le aree funzionali e i corrispondenti valori in tep, ricavati con gli appositi fattori di conversione; 2) gli acquisti di energia in kWh elettrici e Smc di gas e i corrispondenti valori in tep; 3) le tonnellate di prodotti realizzati. Non è stata compilata la parte relativa all'autoproduzione, poiché non esistente; gli indicatori delle prestazioni energetiche sono stati espressi in tep/ton (Fig. 8) e nella sezione relativa alla rendicontazione degli interventi di efficientamento energetico svolti sono stati riportati i valori del recupero di energia termica e del risparmio elettrico.

Utilizzando i dati energetici ricavati con la diagnosi sono stati calcolati gli indicatori di circolarità e il livello complessivo dell'azienda, seguendo la metodologia della UNI/TS 11820:2022 (Fig. 9). Avendo a disposizione anche i dati delle precedenti diagnosi energetiche è stato elaborato il quadro sinottico comparativo degli andamenti delle strategie integrate di decarbonizzazione, in particolare delle categorie dell'autoproduzione energetica, dell'efficientamento energetico e delle soluzioni di economia circolare, riportate dalla letteratura (The European House Ambrosetti, 2023).

In seguito si è utilizzato un software di modellazione energetica per la valutazione di due interventi: l'efficientamento energetico del sistema di climatizzazione nell'area della fabbrica relativa al confezionamento e l'autoproduzione di energia elettrica tramite un impianto fotovoltaico (Fig. 10). Ai fini della corretta modellazione sono state utilizzate le informazioni sugli impianti raccolte attraverso l'audit di diagnosi energetica, mentre per la calibrazione sono stati presi in esame i profili orari dei consumi reali in alcune giornate d'interesse, oltre ai dati aggregati a livello mensile. È quindi realizzata la simulazione energetica del modello ex ante sulle ipotesi di intervento, per verificare la calibrazione attraverso un processo iterativo di comparazione dei risultati con i dati reali (CIBSE, 2020), ed ex post (Figg. 11-14; Tab. 1). I dati sui consumi e sull'autoproduzione energetica simulati sono stati successivamente sottoposti alle stesse procedure di trasformazione in KPI e riportati nel quadro sinottico per la valutazione comparativa con lo stato

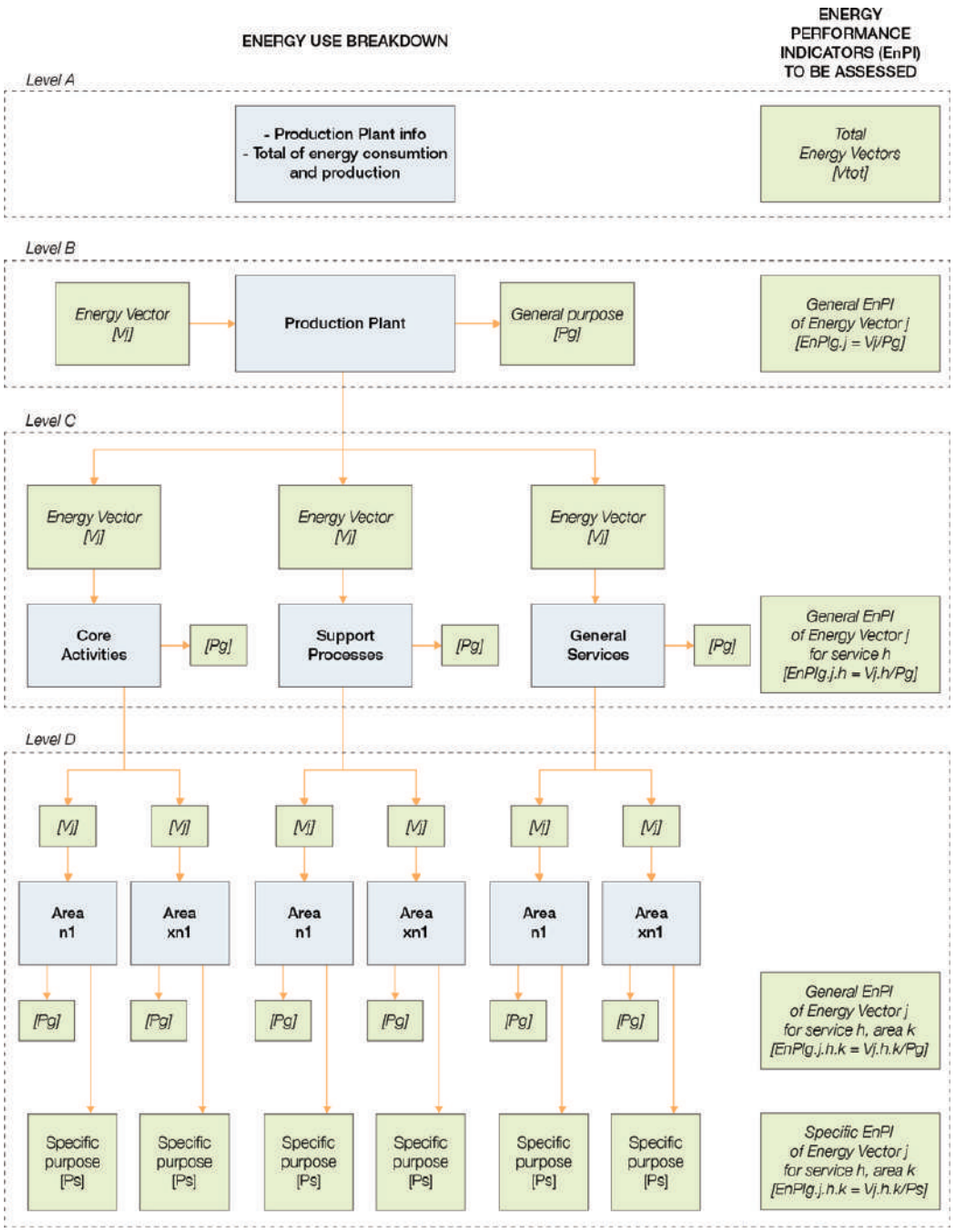


Fig. 3 | Diagram of the corporate energy structure, consumption analysis levels and performance indices to be assessed in accordance with Standard EN 16247 (source: ENEA, 2021).

dell'arte registrato in precedenza (Tab. 2). I risultati dimostrano che la combinazione dei due interventi di transizione energetica ipotizzati, efficientamento e autoproduzione, ha implicazioni dirette anche sulle performance di circolarità.

Il gemello digitale della fabbrica per il miglioramento delle prestazioni energetiche e di circolarità in Azienda | La diagnosi energetica, oltre a rappresentare un adempimento normativo, può essere concepita come dispositivo conoscitivo propedeutico alla valutazione della circolarità aziendale, in quanto implica la raccolta e la strutturazione sistematiche dei dati relativi ai consumi energetici, ai flussi di approvvigionamento e ai sistemi di autoproduzione. L'analisi dei vettori energetici in ingresso e delle modalità di utilizzo nei processi costituisce una base informativa essenziale per la definizione delle strategie circolari di ottimizzazione delle risorse e di riduzione degli impatti ambientali. Gli strumenti digitali a disposizione svolgono un efficace lavoro di monitoraggio puntuale e affidabile.

Tuttavia l'attuale workflow di redazione delle diagnosi evidenzia significative criticità poiché basato sullo scambio manuale di file 'agnostici', statici e non interconnessi, custoditi in sistemi eterogenei e trasmessi tra gli addetti tramite corrispondenza elettronica. Tale frammentazione comporta ridondanze, rischio di errore umano, assenza di aggiornamento in tempo reale e mancata interoperabilità tra sistemi IT e OT, rendendo il processo prevalentemente compilativo e poco integrato nella routine operativa quotidiana

Il gemello digitale della fabbrica si configura dunque come strumento abilitante per l'evoluzione metodologica della diagnosi energetica, poiché può rendere la raccolta dei dati attività tutt'altro che straordinaria e discontinua. Sviluppi futuri del gemello digitale dovrebbero prevedere un'apposita sezione che organizza le informazioni già presenti nei database federati, agevolandone la lettura a vantaggio degli audit. Allo stesso modo, attraverso apposite interfacce, il gemello digitale può fornire i quadri sinottici per il controllo integrato delle transizioni energetica e circolare, previa selezione di KPI coerenti con le prescrizioni normative della diagnosi energetica e della UNI/TS 11820:2022 (UNI, 2022b), come dimostrato dalla metodologia adottata nel presente studio. Indicatori quali i consumi specifici per unità di prodotto, la quota di energia autoprodotta, i tassi di recupero e di riutilizzo delle risorse possono essere monitorati in tempo reale e riferiti a specifici asset o aree funzionali, consentendo valutazioni comparative in intervalli temporali precisi.

Un ulteriore elemento qualificante, come dimostrato dal caso di studio analizzato, riguarda infine la capacità previsionale. La metodologia della diagnosi energetica richiede l'individuazione e la valutazione economica di interventi futuri; ciò rende strategica la possibilità di simulare scenari di efficientamento, consentendo eventualmente anche l'elaborazione di percorsi di decarbonizzazione, come già avviene alla scala urbana (Longo et alii, 2024). È pertanto necessario superare il dualismo tra i gemelli digitali meramente informativi, orientati al Facility Management, e quelli simulativi, dotati di capacità di analisi energetica.

Il Common Data Environment (CDE) è la piattaforma collaborativa più utilizzata in fase di progettazione; tuttavia negli ultimi anni ha suscitato crescente interesse anche per la sua integrazione nei gemelli digitali orientati al facility management, in quanto in grado di supportare processi e attori lungo l'intero ciclo di vita dell'opera e di contribuire al miglioramento delle prestazioni degli edifici nella fase operativa (D'Amore, 2025). Il CDE dovrebbe mettere a disposizione il modello sempre aggiornato allo stato di fatto, mentre ulteriori sviluppi delle piattaforme dei gemelli digitali dovrebbero curarne l'integrazione con i software di simulazione energetica, sfruttando l'interoperabilità dei modelli BIM, per consentire di elaborare scenari previsionali più raffinati, valutando ex ante gli effetti combinati su consumi, costi, emissioni e potenziali ricadute sulla circolarità dei processi (Fig. 15). In letteratura è dimostrato che i flussi informativi BIM-to-BEM possono supportare i processi decisionali e l'ottimizzazione delle prestazioni energetiche dei sistemi

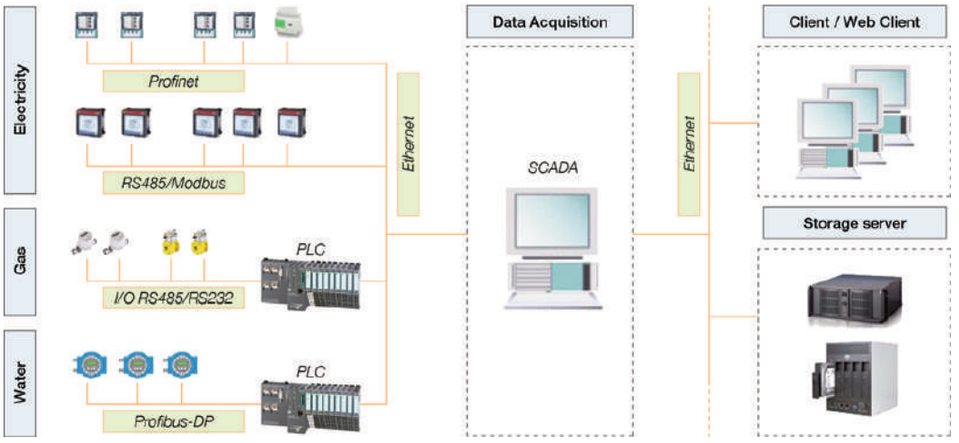
produttivi (Osello et alii, 2024). In questa prospettiva il gemello digitale aziendale diventerebbe una piattaforma integrata di conoscenza, controllo e simulazione, capace di supportare processi decisionali complessi basati sulla valutazione congiunta delle interdipendenze tra le performance energetiche e quelle circolari, superando definitivamente approcci settorializzati e frammentari.

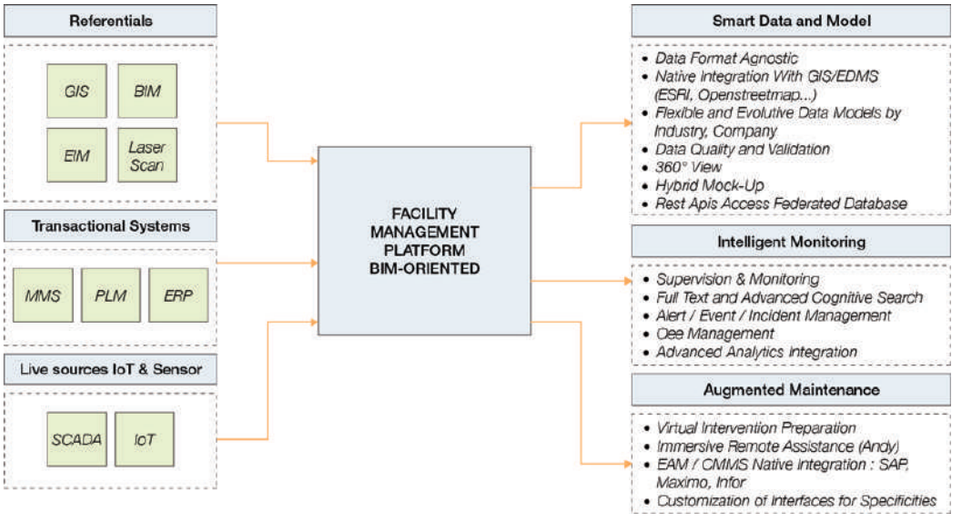
Conclusioni | Lo studio ha analizzato le possibili sinergie tra le diverse strategie di decarbonizzazione industriale e ha proposto un framework metodologico integrato per la valutazione congiunta delle prestazioni energetiche e di circolarità delle imprese produttive. L'analisi ha evidenziato che gli strumenti e le metodologie già disponibili nel quadro normativo nazionale ed europeo, quali la diagnosi energetica disciplinata dalla serie UNI CEI EN 16247:2022 (UNI, 2022a) e la metodologia di misurazione della circolarità definita dalla UNI/TS 11820:2022 (UNI, 2022b), possono essere utilizzati in modo complementare, valorizzando una base informativa in larga parte comune.

Il contributo principale del presente studio consiste nell'aver strutturato una procedura operativa che consente di mettere in relazione gli indicatori energetici e di circolarità, superando l'approccio tradizionalmente settoriale con cui tali dimensioni vengono analizzate nelle pratiche aziendali. L'integrazione dei dati provenienti dai sistemi di monitoraggio dei consumi e degli approvvigionamenti energetici con le informazioni relative alla produzione consente infatti di costruire un quadro sinottico delle strategie, evidenziandone l'andamento nel tempo e le reciproche interdipendenze.

Il caso studio analizzato, relativo a uno stabilimento di una grande azienda multinazionale del settore agroalimentare, ha dimostrato la fattibilità operativa della metodologia proposta. L'elaborazione della diagnosi energetica, il calcolo degli indicatori di circolarità e la simulazione energetica dinamica degli interventi migliorativi hanno consentito di valutare in modo integrato gli effetti di strategie quali l'efficientamento energetico e l'autoproduzione da fonti rinnovabili. I risultati mostrano che gli interventi finalizzati alla transizione energetica generano benefici misurabili anche in termini di circolarità delle risorse, confermando l'esistenza di sinergie rilevanti tra le due traiettorie di transizione.

Un ruolo fondamentale in questo processo è svolto dalle tecnologie digitali:i sistemi di monitoraggio avanzati, le piattaforme di gestione dei dati e i gemelli digitali costituiscono infatti l'infrastruttura abilitante per la raccolta, l'integrazione e l'analisi dei dati necessari alla valutazione delle prestazioni ambientali. In prospettiva l'evoluzione dei gemelli digitali verso piattaforme integrate di controllo e simulazione potrà rendere possibile un supporto decisionale sempre più efficace, consentendo di valutare ex ante gli effetti di strategie energetiche e circolari su consumi, emissioni, costi e utilizzo delle





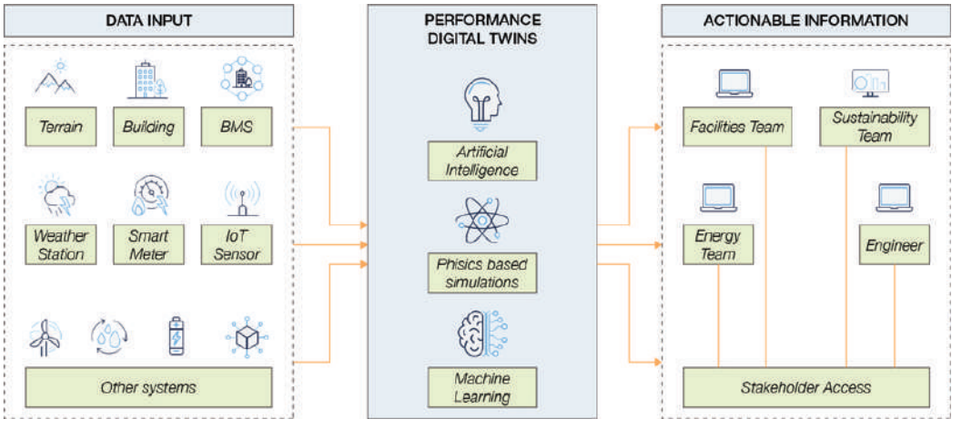


Fig. 4 | Diagram of the architecture of a digitalised energy monitoring system (credit: the Authors, 2025).

Fig. 5 | Diagram of the potential of a BIM-oriented Digital Twin platform for Facility Management and the integration and federation of heterogeneous data present in the various factory systems and enabled functions (credit: the Authors, 2025).

Fig. 6 | Diagram of the potential of a Digital Twin oriented towards energy simulation (credit: IES, 2024).

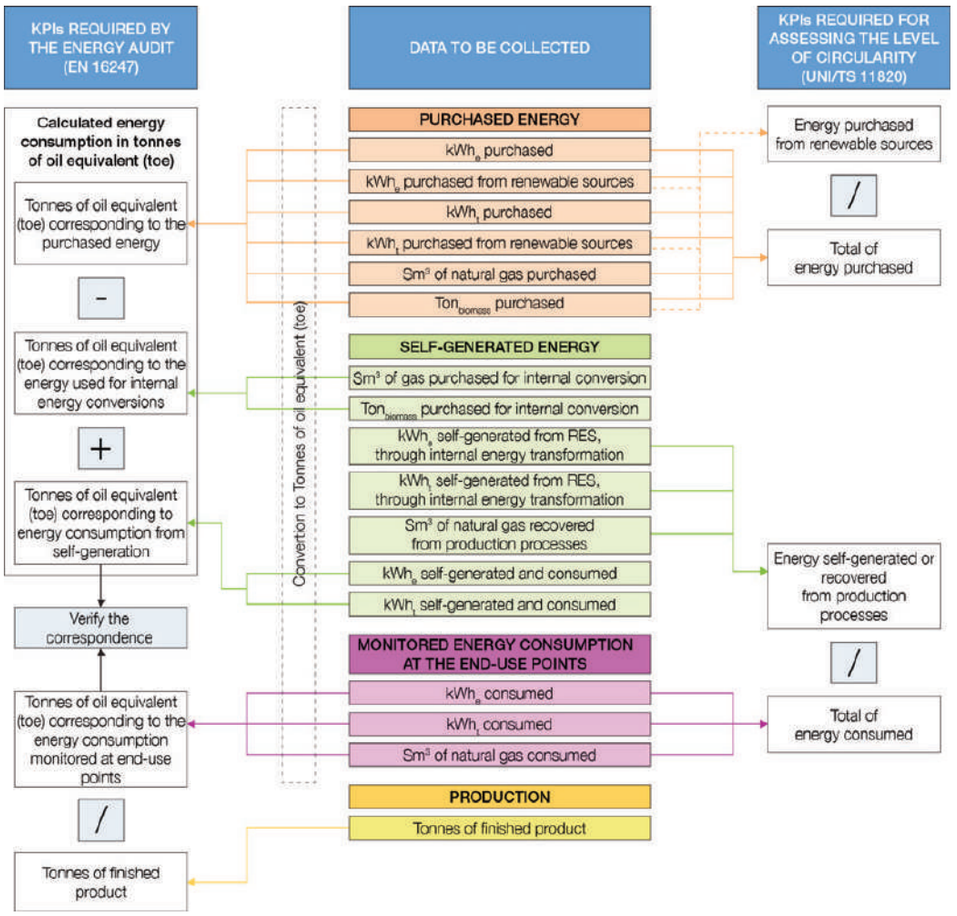


Fig. 7 | Data to be collected and KPIs to be calculated in the methodology for energy audit and measurement of the circularity level (credit: the Authors, 2025).

risorse. I limiti dello studio riguardano la circoscrizione della valutazione di circolarità all'ambito energetico in fase operativa; ulteriori sviluppi dovrebbero estendere il calcolo almeno a tutti gli indicatori legati alle emissioni lungo l'intero ciclo di vita della fabbrica, incluso il carbonio incorporato, mirando quindi all'arricchimento informativo del gemello digitale. In merito alla trasferibilità del lavoro in altri stabilimenti si segnala la necessità di dotarsi di un sistema di monitoraggio energetico accurato e capillare, nonché della disponibilità e della completezza di tutti i dati relativi alle caratteristiche costruttive, impiantistiche e di utilizzo dell'edificio, ai fini di una modellazione coerente nella fase di simulazione. Le barriere alla diffusione della metodologia proposta riguardano la dotazione di competenze, soprattutto nelle realtà meno strutturate come le PMI, e i costi di implementazione dell'infrastruttura digitale.

Il framework proposto contribuisce non solo al miglioramento delle performance ambientali delle aziende, ma anche agli obiettivi dell'Agenda 2030 in tema di energia pulita, innovazione industriale, produzione responsabile e azione per il clima. Inoltre rende evidente la necessità di superare l'attuale compromesso con l'obiettivo di ridurre le disuguaglianze, dovuto al gap tecnologico e di competenze tra grandi imprese e PMI, incentivando un accesso più ampio all'innovazione digitale. I soggetti interessati allo studio vanno dai manager responsabili della transizione sostenibile delle aziende (Zannoni et alii, 2024) ai decisori politici. Ulteriori sviluppi della ricerca potranno riguardare l'applicazione della metodologia a un numero più ampio di casi studio e l'integrazione dei gemelli digitali con strumenti avanzati di simulazione e analisi predittiva, al fine di rafforzare il ruolo dei dati nei processi decisionali orientati alla sostenibilità.

Among the goals of the 2030 Agenda (UN, 2015) for sustainable development is the need to transform economic models and the industrial sector so that growth and development are decoupled from forms of resource exploitation that exceed regenerative capacity and generate environmental impacts in terms of emissions and waste (UNEP, 2011). Such industrial innovation contributes to Sustainable Development Goal (SDG) 9 of the Agenda and is shown to be in synergy with SDG 7, as it promotes energy efficiency and the use of renewable sources; with SDG 12, for the transition to circular models and the efficient use of resources; and with SDG 13, because it is geared towards decarbonisation and the reduction of emissions. Indirect benefits and certain trade-offs with SDG 10 on reducing inequalities are emerging, since whilst on the one hand the transition towards circular economy models stimulates demand for new skills and the overhaul of material and energy supply chains to the benefit of employment and local communities (Losco et alii, 2024), on the other, the adoption of technologies and control and management tools remains limited among small and medium-sized enterprises (SMEs; Trevisan et alii, 2023).

In line with these goals, the European Commission (2019) launched the Green Deal to achieve climate neutrality. It identifies the circular, energy, and digital transitions as key drivers (Fig. 1). The circular transition aims to close cycles (EMF, 2013), reduce waste, and preserve the value of products, components, and materials (Paganin et alii, 2024). It is integrated with the energy transition, which aims to decarbonise through energy efficiency and transition away from fossil fuels. The two paths are complementary, often supported by European policies that promote actions benefiting both. This leads to less dependence on external resources and greater resilience of the production system, with environmental and socio-economic benefits.

In this context, the digital transition plays an enabling role, providing tools for monitoring, collecting, analysing and sharing data. It also supports the simulation of future scenarios, facilitates performance monitoring, and aids strategic decision-making for sustainable resource management (Rigillo, Galluccio and Paragliola, 2023). Ecological and digital transitions are increasingly addressed through systemic approaches and open innovation processes that involve various stakeholders (Barbero and Ferrulli, 2023).

Industry's environmental commitment is encouraged by growing consumer awareness, the introduction of regulatory requirements, incentive schemes and the influence of EU policies on financial markets (European Commission, 2020).

It is therefore clear that there is a need to develop a comprehensive assessment framework capable of simultaneously considering energy and circularity indicators, so that strategic corporate planning is not limited to reducing consumption but extends to the overall and systemic assessment of the organisation's environmental performance. In this context, this research contributes to the body of research investigating the combination of existing methodologies in the environmental field, aiming to provide a systemic understanding of the impacts of human activities (Sposito and De Giovanni, 2023). The goal is to develop an integrated framework that considers the central role of digital tools in the transition towards a more sustainable industry.

In this light, this paper presents some results from a PON PhD Fellowship project funded by the Italian Ministry through ESF REACT-EU resources on innovation-related topics lasted from 2022 to 2024. A major multinational company in the agri-

food sector supported the research, contributing to data sharing and the preparation of energy audits. The innovation of this research lies in overcoming the current fragmentation between energy audit tools and circularity measurement tools, through the methodological integration of the UNI CEI EN 16247-1:2022 and UNI/TS 11820:2022 standards (UNI, 2022a, 2022b), supported by digital and simulation tools. This research also defines a synoptic framework of KPIs capable of clarifying the interdependencies between the energy and circular transitions.

The paper is scientifically relevant because it optimises and systematises indicators and methodologies available to companies, demonstrates the benefits of advanced digital tools, and, through a case study involving a large enterprise, can inform incentive policies for transferring these results to SMEs, thereby contributing to the reduction of inequalities. The paper is structured as follows: the first section introduces existing strategies and tools for the industry's triple transition; the second outlines the methodology used to develop the integrated assessment framework; the third focuses on its application to the case study; the fourth discusses the digital tools supporting the methodology; and the concluding section identifies limitations and future developments.

Tools for monitoring companies' integrated decarbonisation strategies | The literature highlights that achieving industrial decarbonisation targets requires the adoption of integrated strategies, with particular reference to energy efficiency, self-generation from renewable sources (primarily through photovoltaic systems), circular economy practices and digital solutions (The European House Ambrosetti, 2023; Fig. 2). Analyses specifically relating to the agri-food sector also confirm that the combination of measures concerning energy supply, heat recovery, technological innovation, electrification and Industry 4.0 digital technologies yields more substantial energy savings and emission reductions than isolated actions (Bazzocchi et alii, 2023; Realini et alii, 2017; Gobbi et alii, 2021).

Tools and methodologies, based on specific regulatory standards, are available to industrial companies as they navigate the dual transition towards circularity and energy sustainability; they enable effective assessments but operate in parallel, whilst demonstrating a complementary relationship because they are based on a partly shared dataset, from which they derive their respective key performance indicators (KPIs): UNI/TS 11820: 2022 'Measurement of circularity – Methods and indicators for measuring circular processes in organisations' (UNI, 2022b), with regard to the circular transition, and the energy audit governed by Italian Legislative Decree 102/2014 (Presidente della Repubblica Italiana, 2014) and the standards of the UNI CEI EN 16247:2022 series (UNI, 2022a), which is instrumental to the energy transition and mandatory in the cases provided for by law.

Although these methodologies originated in distinct fields, they can converge in the creation of an integrated system for measuring companies' energy and environmental performance, which must be based on advanced digital tools capable of accurately collecting data on consumption, procurement, self-generated energy and factory output, as well as monitoring and, above all, analysing and processing this data. The legislation on energy audits also defines the criteria for monitoring; however, this aspect is not addressed by UNI/TS

PLANT					PERFORMANCE COMPARISON
Production Volumes 2018 - 2022					Increase in production volumes
Production Volumes 2018 [Ton]		Production Volumes 2022 [Ton]			
36,585		37,836			3%
Total electricity consumption 2018 - 2022					Reduction of electricity consumption general KPI
Electricity consumption 2018 [kWh]	[Toe]	KPI 2018 [kWh/Ton]	Electricity consumption 2022 [kWh]	[Toe]	KPI 2022 [kWh/Ton]	
12,796,000	2,393	349.8	11,790,053	2,205	311.6	-11%
Total natural gas consumption 2018 - 2022					Reduction of natural gas consumption general KPI
Natural gas consumption 2018 [Sm3]	[Toe]	KPI 2018 [Sm3/Ton]	Natural gas consumption 2022 [Sm3]	[Toe]	KPI 2022 [Sm3/Ton]	
2,614,038	2,185	71.5	2,227,818	1,862	58.8	-18%

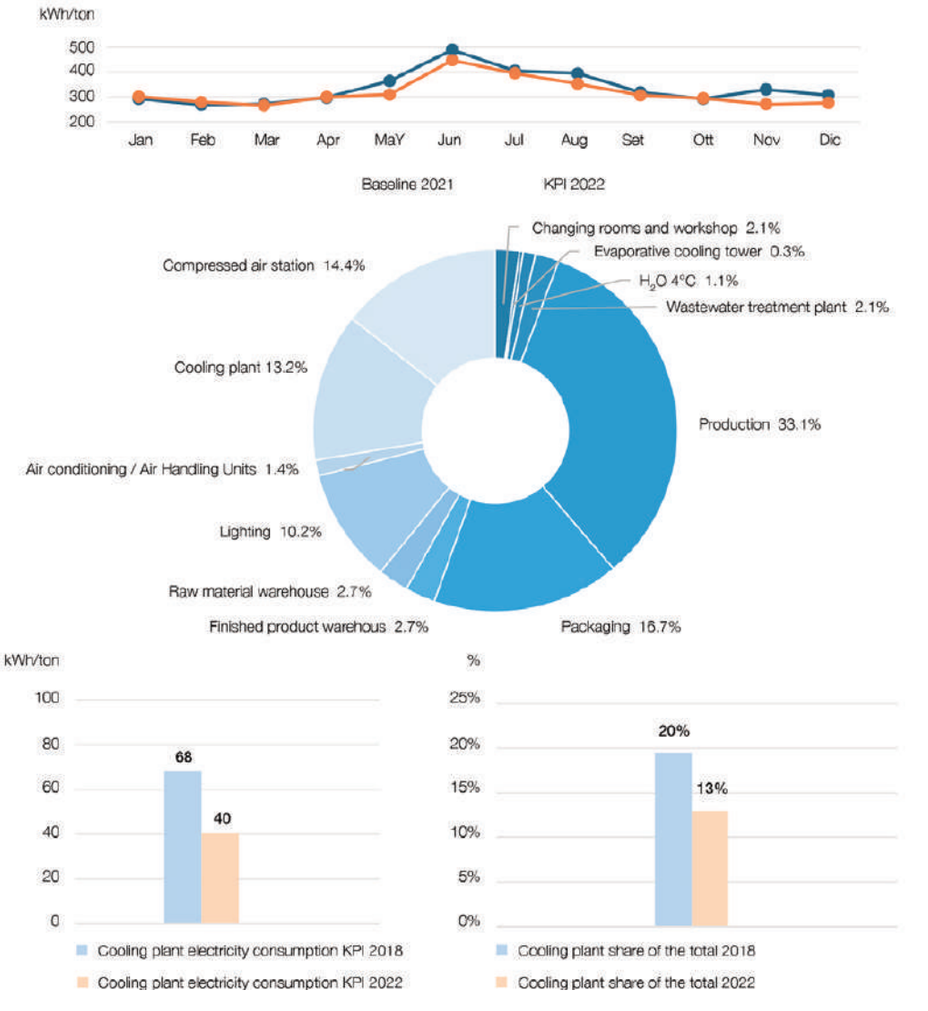


Fig. 8 | Some results of the energy audit conducted for the case study (credit: the Authors, 2025).

	N. Indicator	Type of evaluation	Type of indicator	Weight	Indicator value	Indicator weighted value
Energy and water resources	11	Product/Service	Specific	1	0,000	0.000
	12	Product/Service	Specific	1	0,076	0.076
	13	Product/Service	Specific	1	1,000	1.000
	14	Product/Service	Specific	1	0,000	0.000
	15	Product/Service	Specific	1	0,034	0.034

Self-generated electricity from RES	0.000
Thermal energy from recovery processes	0.076
Electricity purchased from RES	1.000
Thermal energy purchased from RES	0.000
Water from recycling	0.034
LEVEL OF CIRCULARITY	

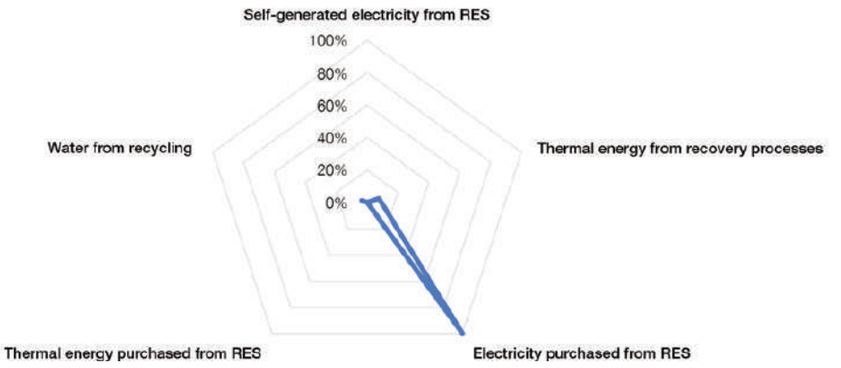


Fig. 9 | Calculation of the circularity level relating to energy and water resources in the case study (credit: the Authors, 2025).

11820:2022 (Ministero dello Sviluppo Economico, 2016). UNI/TS 11820:2022 defines a methodological framework for measuring circularity, inspired by the principles of Life Cycle Thinking. It is applicable to product, service or mixed-business organisations and is independent of sector-specific benchmarks. In line with the principles of ISO 59000:2024 (ISO, 2024) and ISO 14067:2018 (ISO, 2018), it integrates environmental, social, and economic dimensions. The system provides indicators organised into six areas, including energy and water resources, the focus of this study.

The indicators are classified as 'core', 'specific' and 'rewarding', and are based on KPIs that include, for example, the proportion of renewable raw materials out of total inputs, the percentage of water recovered relative to total demand, the proportion of waste sorted for recycling, self-generated electricity and heat, the product's carbon footprint, and elements of industrial symbiosis. The circularity level is a percentage value calculated as the weighted average of the indicators applicable to the company. The calculation can be broken down by category, supporting targeted analyses and radar-chart representations. The methodology requires, as a preliminary step, defining the scope of assessment and verifying data quality in terms of accuracy, representativeness, and reproducibility.

The energy audit is a key tool in the energy transition. Introduced by Directive 2012/27/EU (European Parliament and the Council of the European Union, 2012) and transposed by the aforementioned Legislative Decree 102/2014, it requires a systematic analysis of energy flows, the identification of inefficiencies and the proposal of technically and economically viable measures. In accordance with the UNI CEI EN 16247:2022 (UNI, 2022a), the methodology involves the clustering of multi-site companies, the construction of a multi-level energy diagram, the compilation of a detailed description of the existing systems and their technical characteristics, the modelling of energy carriers in order to identify priority areas for intervention, and the calculation of Energy Performance Indicators.

The main KPIs are the General Energy Performance Index (EPI) and the Specific Energy Performance Index (EnPI), expressed as consumption relative to energy drivers, such as the ratio between tonnes of oil equivalent (toe) for a given energy carrier and tonnes of finished product (Fig. 3). The methodology also requires the identification of efficiency measures to be implemented over a three-year period, specifying economic and financial indicators such as the payback period, NPV (Net Present Value), and IRR (Internal Rate of Return); furthermore, organisations are required to report the results in terms of energy and cost savings relating to the measures previously declared and implemented (ENEA, 2021).

Digital monitoring systems form the enabling infrastructure for the digital transition and are a prerequisite for the reliability of assessments of other transitions. Indicators such as the Smart Readiness Indicator also enable the assessment of the degree of integration of digital technologies in buildings and their contribution to the energy transition (Azzalin, 2024), providing strategic support for the development of environmental policies (Lauria et alii, 2025).

The ENEA (Italian National Agency for New Technologies, Energy and Sustainable Economic Development) Guidelines require permanent monitoring plans for all energy carriers used within the company, as well as comprehensive measurements of core activities and auxiliary and general services, with coverage proportional to consumption in each functional area. It can be effective to adopt multi-level architectures with 'smart meters' using industrial protocols, such as Profibus and Profinet, communicating with Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA) systems, which enable real-time analysis of power factors and load profiles of the installations, as well as threshold exceedances, and allow data to be archived in detail down to the quarter-hourly level. The capabilities of these systems are significant for management and energy audits (Fig. 4).

BIM-oriented facility management platforms provide advanced real-time digital control over assets and energy carriers. These platforms make all relevant information available in a single shared environment. They integrate various factory systems and eliminate 'siloed management' in line with the Industry 4.0 paradigm, which is based on interconnection, virtualisation, and data-driven process management (Ministero dello Sviluppo Economico, 2017). The collaborative platforms collect data from sensors, SCADA systems, ERP, and MES systems. These include energy and production flows, plant characteristics, maintenance status, and planned and completed maintenance work. They create a federation of up-to-date databases to support operational and managerial stakeholders. Integration with a BIM model enables information to be linked to viewable virtual objects, whilst geometric data on spaces facilitates measurement tasks during the design of new projects (Russo Ermolli, 2019). Such an advanced control and management system is referred to as a 'digital twin', and takes the form of a cyber-physical model of the factory equipped with a structured, constantly updated information system (Green Building Council Italia, 2024; Fig. 5). It should be noted that another strand of the literature uses the term 'digital twin' to refer to simplified geometric models used to perform dynamic energy simulations, as they are capable of connecting to the sensors and energy and environmental monitoring systems of the physical spaces to which they relate. When suitably calibrated, they demonstrate energy behaviour consistent with that of the actual building (Fig. 6).

Taken together, these tools – which offer significant potential for synergy – form a system which, when properly integrated, is capable of objectively measuring an industrial organisation's level of maturity in relation to environmental challenges, pro-

viding a quantitative basis for continuous improvement and ESG reporting. In light of the integrative potential of these tools, this paper presents a framework for developing an advanced tool to monitor energy and environmental performance, designed to support complex, informed corporate decision-making. This tool can correlate energy and circularity performance, identify consistent KPIs, move beyond sector-specific approaches, and enable a systemic assessment of the interdependencies between the two transitions.

Part of the literature addresses the issue of integrated assessment of the energy and circular transitions for industrial buildings from the perspective of building refurbishment, using the energy-related indicators set out in UNI/TS 11820:2022 (UNI, 2022b) and citing digital technology as a system for tracking material flows in construction activities (Baiani et alii, 2024). Other authors have focused on the creation of digital twins for the implementation of decarbonisation pathways at both the building and urban district scales (Longo and Roversi, 2025); still others have examined their applications for energy efficiency (Ba et alii, 2025), without focusing on circularity. This study goes beyond the sectoral approach of the current state of the art and provides support for the operational management of the factory.

Methodology for assessing synergies through the use of digital tools | The methodology developed for the combined assessment of energy efficiency and circularity performance, and their trends over time, is based on a data-driven approach facilitated by various types of digital tools: 1) a system for monitoring and collecting data on energy carriers in the field at various levels of detail, from final energy uses to the main incoming energy meters of the plant; 2) software for analysing and processing the collected data; 3) dynamic energy simulation software for modelling the factory and quantifying energy demand and the associated greenhouse gas emissions resulting from hypothetical future interventions. The assessment methodology adopted is set out below. The first three phases were repeated in two different years to conduct a comparative analysis from the fourth phase onward.

The first phase involves identifying the data to be collected on energy carriers, as required by the regulations on energy audits, and extracting this data from on-site digital monitoring systems, at

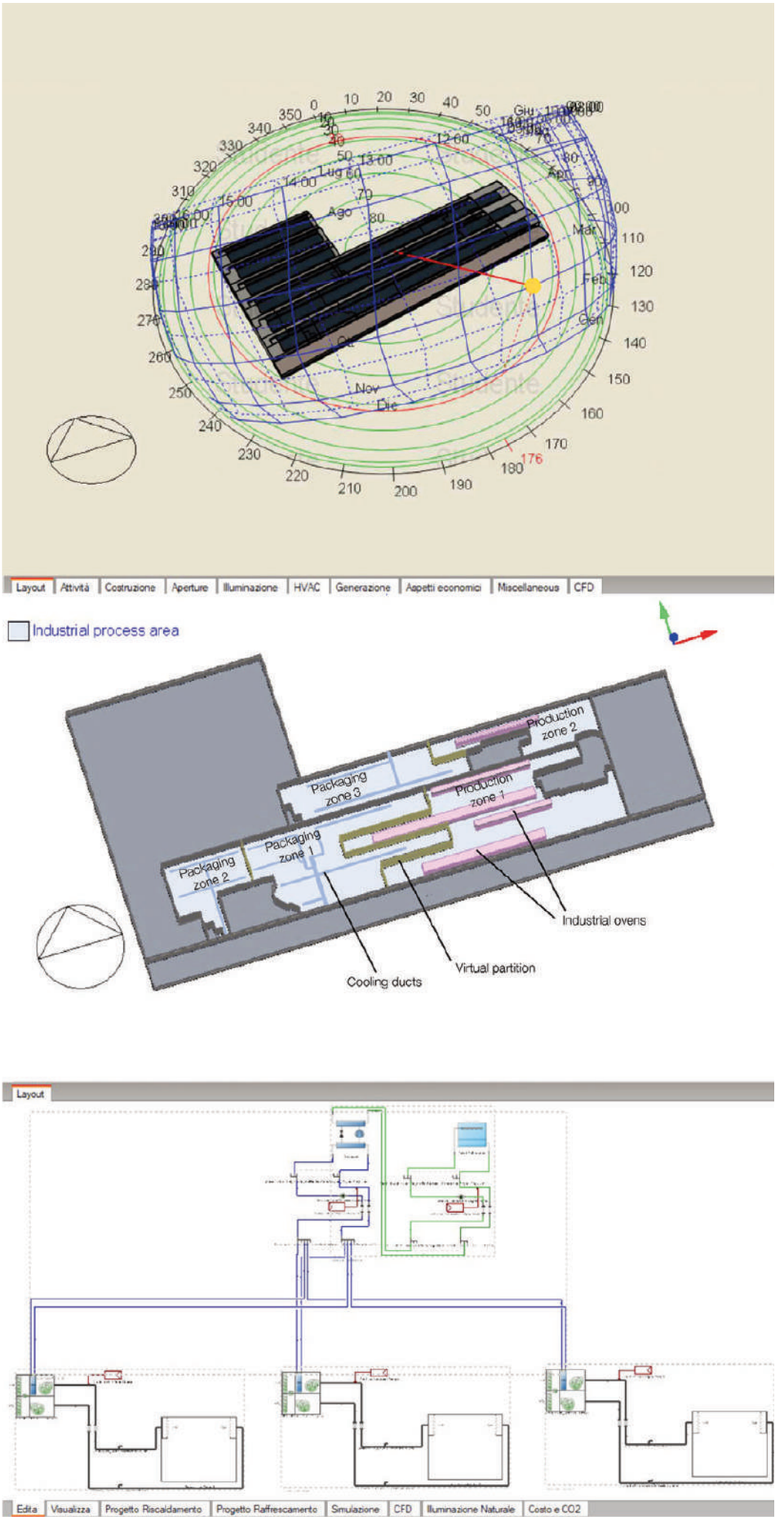


Fig. 10 | Views of the digital model created for energy simulation, relating to the proposed installation of the rooftop photovoltaic system, the distribution of the thermal zones under analysis, and the layout of the cooling system subject to energy efficiency improvements (credit: the Authors, 2025).

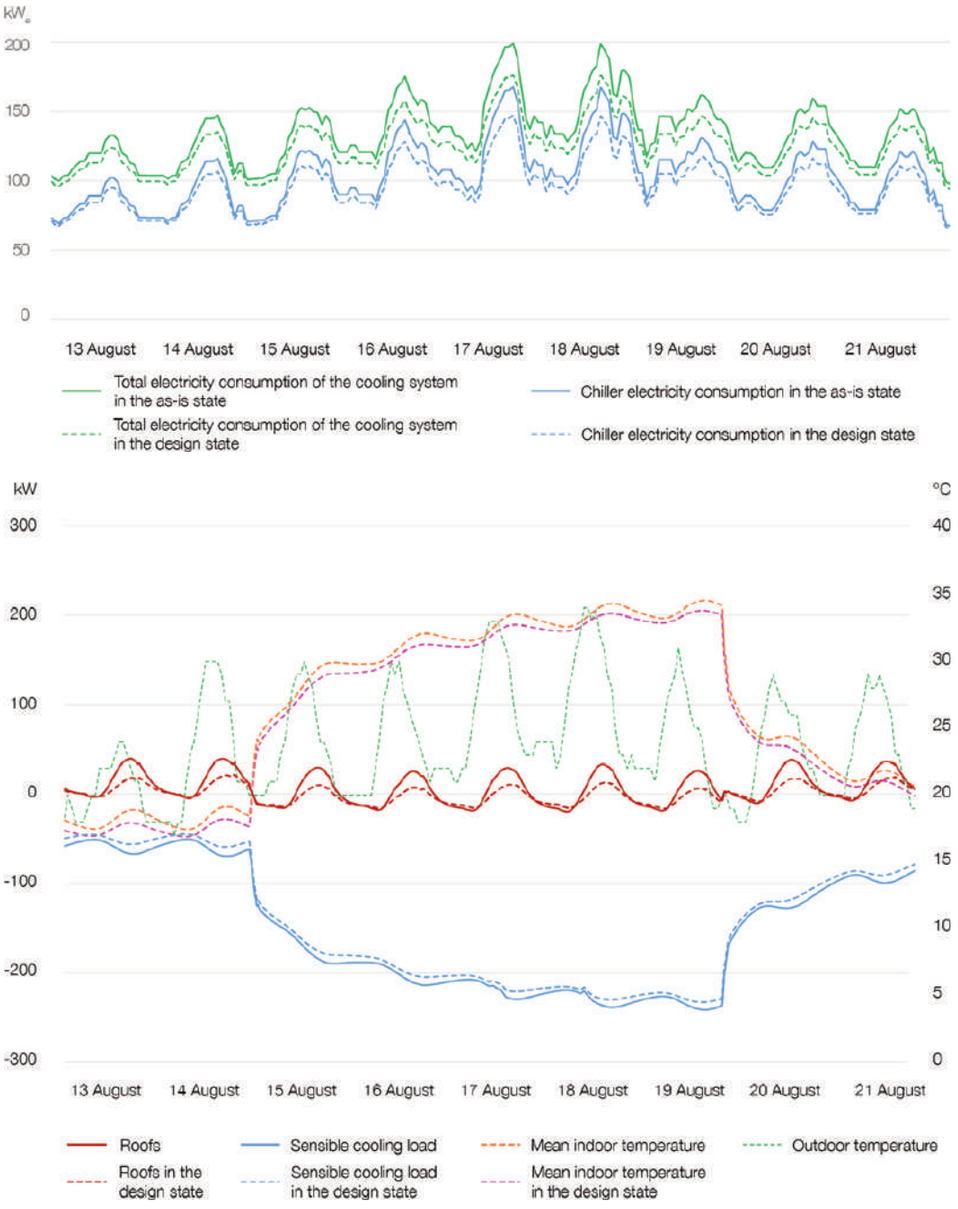


Fig. 11 | Graph analysing the energy savings achieved following the energy efficiency improvement of the cooling system via dynamic simulation: comparison of the hourly electricity consumption of the cooling system and the chiller plant, in the current state and in the design state, during the period from 13 to 21 August (credit: the Authors, 2025).

Fig. 12 | Graph analysing the reduction in internal heat gains associated with the installation of the photovoltaic system: comparison between the current state and the design state of internal heat gains through the roof, hourly cooling demand and room temperatures (credit: the Authors, 2025).

the various levels of detail defined by UNI CEI EN 16247:2022 (UNI, 2022a), relating to the company's energy structure (ENEA, 2021). To ensure the methodology is replicable, it is necessary to identify the system boundary, which corresponds to the entire perimeter of the plant; the data to be collected for processing in subsequent phases concern the hourly electricity and heat consumption of individual production lines, of plants belonging to the auxiliary services category, and of those belonging to general services. Data must also be collected on any self-generated energy and on the production of goods related to the company's activities. The second phase involves carrying out an energy audit, using analysis software to aggregate data and identify KPIs, comparing performance against benchmarks defined in the Best Available Techniques (Giner Santonja et alii, 2019), and developing the energy model (thermal and electrical). An inventory and description of the technical characteristics of the systems must also be carried out, as they are useful during the modelling and dynamic energy simulation phases.

It is important to quantify, for each energy source, the energy purchased from renewable and fossil sources, any portion purchased that is used for internal conversion (for example, in the case of cogeneration), self-generated energy, the self-generated portion consumed internally (net of any exports), and the energy consumption recorded by 'smart' meters which, at a higher level of aggregation, must be consistent with the readings of the main meters. At this stage, the energy efficiency calculation is based on the KPI relating to the ratio of consumption, expressed in toe (tonnes of oil equivalent), to tonnes of finished product. It should be noted that toe values are derived from the units of measurement of energy carriers, using specific conversion factors reported in the literature (ENEA, 2021).

The third phase involves using the quantitative data obtained through the energy audit methodology to calculate the company's circularity level, based on indicators for energy and water resources, in accordance with UNI/TS 11820:2022 (UNI, 2022b). The required KPIs concern energy procurement strategies: self-generation, energy recovery and purchase from renewable sources. In particular, the ratios of electricity and self-generated thermal energy from renewable sources and/or recovery processes to total consumption, and the ratio of electricity and heat purchased from renewable sources to total purchases, must be calculated. The level of circularity is based on the combination of key performance indicators and is expressed as a percentage (Fig. 7).

The fourth phase involves compiling and analysing the results obtained over the two years under review in a summary table. This table illustrates the outcomes of the energy strategies, enabling trends over time to be assessed. It also supports the evaluation of the interconnections between the energy transition and the circular economy, examining how integrating energy efficiency and supply measures affects circularity.

The fifth phase involves using dynamic energy simulation software and creating a factory model calibrated against actual hourly energy data collected and monitored to evaluate improvement

measures. This phase can be carried out provided that information is available on the building's geometric and construction characteristics, the layout and technical specifications of the systems as detailed in the energy audit report, actual energy consumption data collected on site by the monitoring system, and accurate, appropriate climate data.

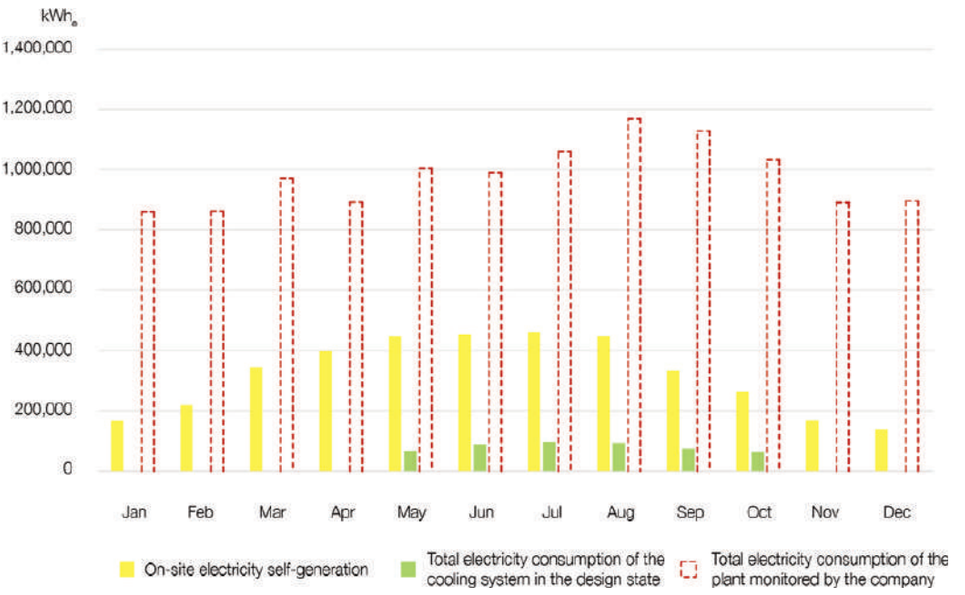
The sixth phase involves importing the energy simulation results into the summary table to assess the benefits of the proposed measures in both the energy and circular transitions.

A case study of a large multinational company in the agri-food sector | The case study focuses on a plant belonging to a large, multi-site agri-food company, equipped with a robust monitoring system that provides data at quarter-hourly intervals.

The energy sources used are electricity, which the company purchases to meet all its requirements through supply contracts certified with a Guarantee of Origin from renewable sources, particularly from hydroelectric power, and natural gas. No on-site generation facilities have yet been installed. The monitoring system has recently been updated and is highly accurate, extending down to the end-use level and enabling data aggregation at the level of functional areas (production lines, boiler plant, chiller plant, compressed air plant, air-conditioning system, raw materials warehouse, finished-goods warehouses, and offices) and by macro-categories (core activities, auxiliary services and general services).

The data collected covered both electricity and heat consumption; monthly figures were extracted from the software and cross-checked against on-site meter readings and utility bills. For certain days, hourly breakdowns were extracted to run energy simulations; furthermore, data on manufactured products were collected via the company's production control software, using time intervals consistent with the energy data. A comprehensive energy audit was carried out and subsequently submitted to ENEA via the dedicated portal, with a summary file completed that set out the data for the various energy carriers for the entire year: 1) consumption in kWh of electricity and standard cubic metres (Smc) of gas for all functional areas, and the corresponding values in toe, calculated using the appropriate conversion factors; 2) energy purchases in kWh of electricity and Smc of gas and the corresponding values in toe; 3) the tonnage of products manufactured. The section relating to self-generation was not completed, as it does not exist; the energy performance KPIs were expressed in toe/tonne (Fig. 8). In the section on reporting energy efficiency measures carried out, the values for thermal energy recovery and electricity savings were reported. Using the energy data obtained from the assessment, circularity indicators and the company's overall level were calculated in accordance with the UNI/TS 11820: 2022 methodology (Fig. 9). As data from previous energy audits were also available, a comparative overview of the trends in integrated decarbonisation strategies was drawn up, focusing in particular on the categories of self-generated energy, energy efficiency and circular economy solutions, as reported in the literature (The European House Ambrosetti, 2023).

Energy modelling software was then used to evaluate two measures: improving the energy efficiency of the air-conditioning system in the factory's packaging area and generating electricity on-site via a photovoltaic system (Fig. 10). For the purposes of accurate modelling, information on the systems gathered through the energy audit was used, whilst for calibration, hourly profiles of actual consumption on selected days of interest were examined, in addition to monthly aggregated data. An ex-ante energy simulation of the model was then carried out for the intervention scenarios; calibration was verified through an iterative comparison of the simulation results with actual data (CIBSE, 2020), followed by the ex-post assessment (Figg. 11-14; Tab. 1). The simulated consumption and self-generation data were subsequently subjected to the same procedures for conversion into KPIs and reported in the summary table for comparative assessment against previously recorded



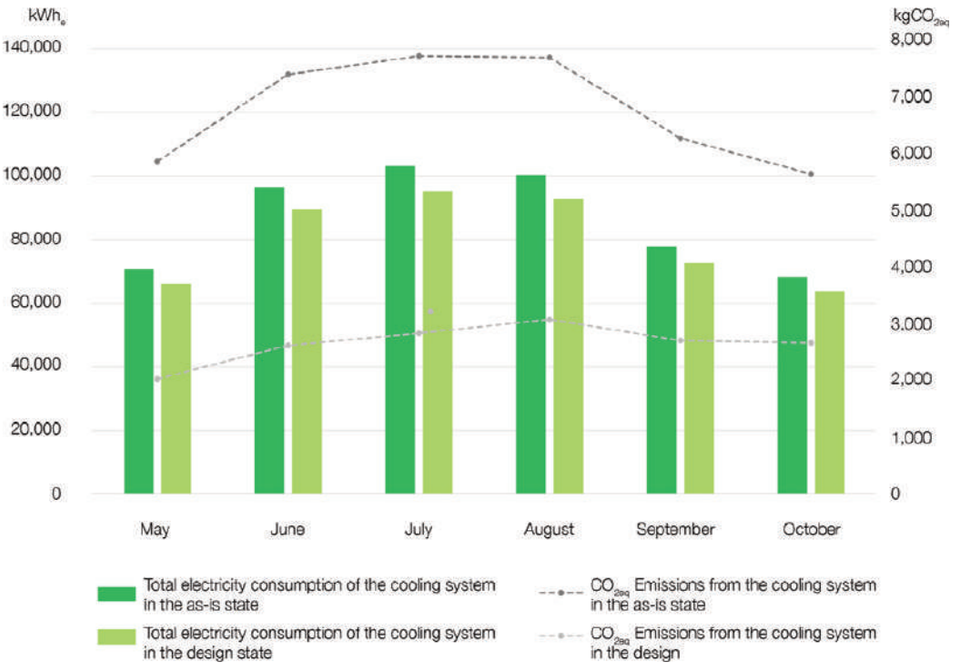


Fig. 13 | Comparative analysis graph of monthly self-generated electricity in the design state versus electricity demand (credit: the Authors, 2025).

Fig. 14 | Comparative analysis chart of the current state and the design scenario regarding CO_{2eq} emissions and monthly electricity demand (credit: the Authors, 2025).

	Comparison of monthly electricity consumption between the current state and the design scenario					
Month	Cooling consumption in the as-is state [kWh_e]	Cooling consumption in the design state [kWh_e]	Consumption delta between the as-is and design scenario [%]	Emissions from the cooling system in the as-is state [$kgCO_{2eq}$]	Emissions from the cooling system in the design state [$kgCO_{2eq}$]	Emissions delta between the as-is and design scenario [%]
January	0	0	0%	0	0	0%
February	0	0	0%	0	0	0%
March	0	0	0%	0	0	0%
April	0	0	0%	0	0	0%
May	70,585	65,961	-6.6%	5,871	2,020	-65.6%
June	96,300	89,249	-7.3%	7,408	2,615	-64.7%
July	102,879	94,995	-7.7%	7,733	2,831	-63.4%
August	100,066	92,802	-7.3%	7,708	3,074	-60.1%
September	77,513	72,336	-6.7%	6,280	2,702	-57.0%
October	68,098	63,483	-6.8%	5,650	2,661	-52.9%
November	0	0	0%	0	0	0%
December	0	0	0%	0	0	0%
	515,441	**478,826**	**-7.1%**	**40,650**	**15,905**	**-60.9%**

Tab. 1 | Comparison table of the simulation results for the project interventions in terms of reduction in monthly electricity consumption and decarbonisation (credit: the Authors, 2025).

Assessment of Key Integrated Decarbonisation Strategies		**2019**	**2023**	**2030**
Energy self-generation	Indicator	Self-generated kWh / total energy consumed	Self-generated kWh / total energy consumed	Simulated self-generated kWh / 2022 total energy consumed
	Methodology	Data collection and measurement according to UNI CEI EN 16247 – energy audits	Data collection and measurement according to UNI CEI EN 16247 – energy audits	Design of a photovoltaic system using energy simulation software
	Data source	Digital energy monitoring systems	Digital energy monitoring systems	Real monitored data for digital-model calibration and climate files for future scenarios
	Results	0	0	33%
Energy efficiency	Indicator	Tonnes of oil equivalent / tonnes of finished product	Tonnes of oil equivalent / tonnes of finished product	Tonnes of oil equivalent for simulated energy consumption / tonnes of finished product in 2022
	Methodology	Data collection and measurement according to UNI CEI EN 16247 – energy audits	Data collection and measurement according to UNI CEI EN 16247 – energy audits	Efficiency project for the air-conditioning system in the packaging area using simulation software
	Data source	Digital energy monitoring systems	Digital energy monitoring systems	Real monitored data for digital-model calibration and climate files for future scenarios
	Results	0.1251 toe/ton	0.1075 toe/ton: -14.1% compared to 2019, of which 0.0026 toe/ton is related to cooling	0.1073 toe/ton: -0.2% compared to 2023, of which 0.0024 toe/ton is related to cooling: -7.7% compared to 2023
Circular economy	Indicator	Circularity %	Circularity %	Circularity %
	Methodology	Measurement according to UNI/TS 11820:2022	Measurement according to UNI/TS 11820:2022	Measurement according to UNI/TS 11820:2022
	Data source	energy audit	energy audit	Simulation output data
	Results	20.7%	22.2%: +7.4% compared to 2019	28.8%: +29.4% compared to 2023

Tab. 2 | Comparative overview of the trends in integrated decarbonisation strategies, specifically in the categories of energy self-generation, energy efficiency and circular economy solutions (credit: the Authors, 2025).

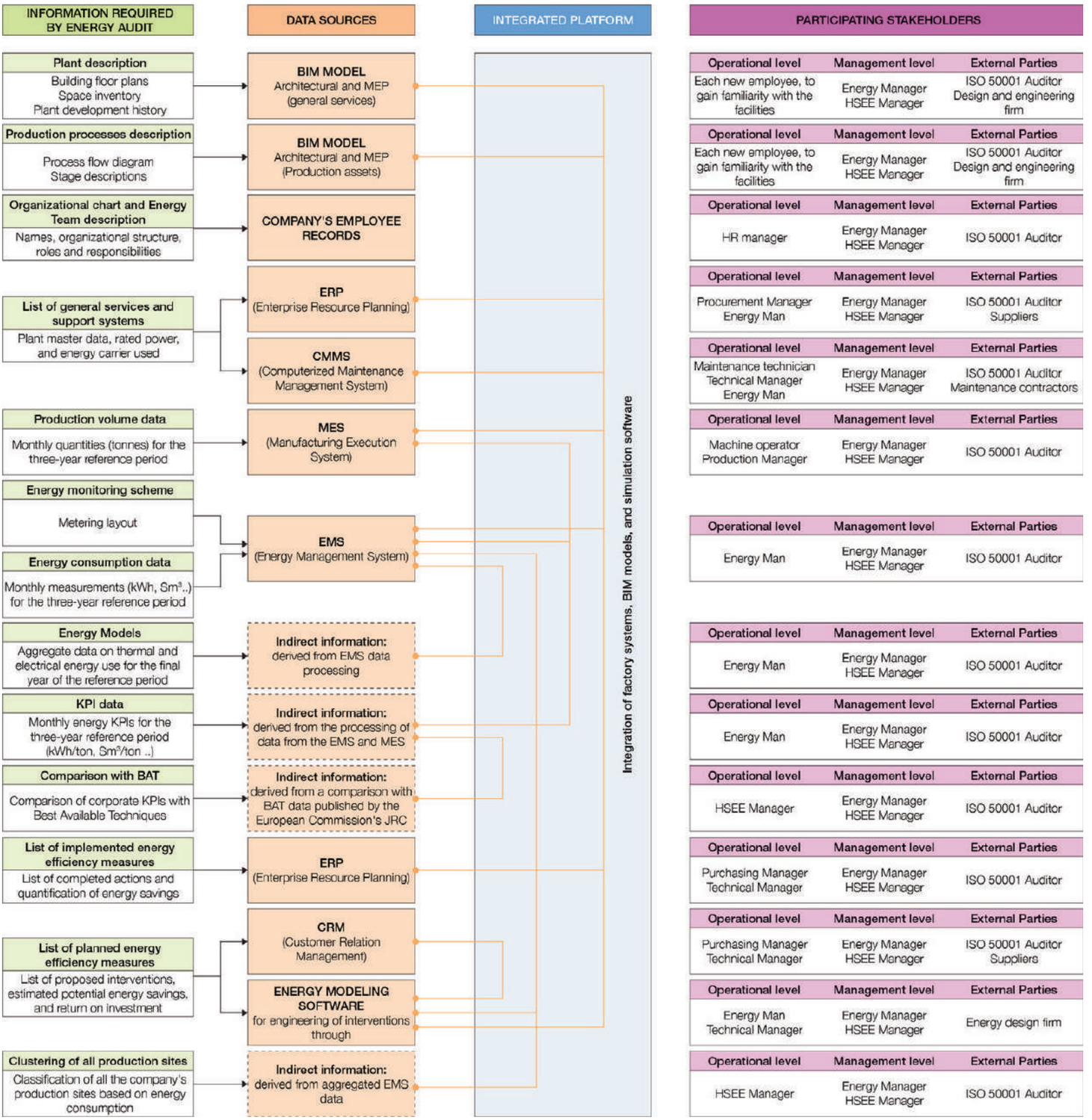


Fig. 15 | Diagram of a collaborative platform for the integration of the factory's management systems and the plant's BIM model, for the optimisation of facility management and energy audits, highlighting relevant information and the stakeholders involved (credit: the Authors, 2025).

baseline (Tab. 2). The results demonstrate that the combination of the two hypothesised energy transition measures – efficiency improvements and self-generation – also has direct implications for circularity performance.

The factory digital twin for improving energy performance and corporate circularity | An energy audit, whilst fulfilling regulatory requirements, can also be seen as a diagnostic tool that lays the groundwork for assessing a company's circularity, as it involves the systematic collection and organisation of data relating to energy consumption, supply chains and self-generation systems. The analysis of incoming energy sources and their use in processes provides essential information for defining circular strategies to optimise resource use and reduce environmental impacts. The digital tools available perform effective, timely and reliable monitoring. However, the current workflow for compiling diagnoses presents significant challenges, as it relies on the manual transfer of isolated, static, and disconnected files, stored in disparate systems and sent between staff via email. This fragmentation creates duplication, increases the risk of error, prevents real-time updates, and hinders interoperability between IT and OT systems,

reducing the process to data entry and poorly integrating it into daily operations. The digital twin of the factory thus serves as an enabling tool for the methodological evolution of energy audits, making data collection routine rather than occasional. Future developments of the digital twin should include a dedicated section that organises the information already available in federated databases, making it easier to interpret for audit purposes.

Similarly, through dedicated interfaces, the digital twin can provide dashboards for the integrated management of the energy and circular transitions, following the selection of KPIs consistent with the regulatory requirements for energy audits and UNI/TS 11820:2022 (UNI, 2022b), as demonstrated by the methodology adopted in this study. Indicators such as specific consumption per unit of product, the share of self-generated energy, and resource recovery and reuse rates can be monitored in real time and linked to specific assets or functional areas, enabling comparative assessments over precise time intervals.

Finally, as demonstrated by the case study analysed, another key factor concerns forecasting capability. The energy audit methodology requires the identification and economic assessment of future interventions; this makes the ability to simulate energy-efficiency scenarios a strategic asset, potentially enabling the development of decarbonisation pathways, as already occurs at the urban scale (Longo et alii, 2024). It is therefore necessary to overcome the dichotomy between purely informational digital twins oriented towards facility management and those capable of simulation and equipped with energy analysis capabilities.

The Common Data Environment (CDE) is the main collaborative platform during the design phase. Recently, it has gained attention for its integration into digital twins oriented towards facility management. The CDE can support processes and stakeholders throughout the life cycle of a building and help improve performance during operations (D'Amore, 2025). The CDE should provide a model that is continuously aligned with the current state. Future digital twin platforms must integrate with energy simulation software. This integration should exploit BIM model interoperability to produce more refined predictive scenarios and assess, ex ante, the combined effects on consumption, costs, emissions, and the circularity of processes (Fig. 15). Studies show that BIM-to-BEM information flows support decision-making and optimise energy performance in production systems (Osello et alii, 2024).

From this perspective, the corporate digital twin would become an integrated platform for knowledge, monitoring, and simulation, capable of supporting complex decision-making processes based on a joint assessment of the interdependencies between energy and circular performance, thereby definitively moving beyond sector-specific, fragmented approaches.

Conclusions | The study analysed the potential synergies between various industrial decarbonisation strategies and proposed an integrated methodological framework for the joint assessment of energy performance and circularity in manufacturing companies. The analysis highlighted how the tools and methodologies already available within the national and European regulatory framework – such as the energy audit governed by the UNI CEI EN 16247:2022 (UNI, 2022a) and the circularity measurement methodology defined by UNI/TS 11820:2022 (UNI, 2022b) – can be used in a complementary manner, drawing on a largely shared information base.

The main contribution of this study lies in the development of an operational procedure that enables energy and circularity indicators to be linked, moving beyond the traditionally sector-based approach typically used to analyse these aspects in business practice. The integration of data from energy consumption and procurement monitoring systems with production-related information enables a comprehensive overview of strategies, highlighting their trends over time and interdependencies. The case study analysed, concerning a plant belonging to a large multinational agri-food company, demonstrated the operational feasibility of the proposed methodology. The preparation of the energy audit, the calculation of circularity indicators, and the dynamic energy simulation of improvement measures enabled an integrated assessment of the effects of strategies such as energy efficiency improvements and self-generation from renewable sources. The results show that measures aimed at the energy transition can also generate measurable benefits in terms of resource circularity, confirming the existence of significant synergies between the two transition paths.

Digital technologies play a key role in this process. Advanced monitoring systems, data management platforms, and digital twins provide the enabling infrastructure for collecting, integrating, and analysing data to assess environmental performance. In the longer term, the evolution of digital twins into integrated control and simulation platforms could enable increasingly effective decision support, enabling ex ante assessment of the effects of energy and circular strategies on consumption, emissions, costs, and resource use.

The limitations of the study relate to the fact that the circularity assessment is restricted to the energy sector during the operational phase; further developments should extend the calculation to include, at the very least, all indicators relating to emissions throughout the factory's entire life cycle, including embodied carbon, thereby aiming to enhance the information contained in the digital twin. With regard to the transferability of the work to other plants, it is worth noting the need for an accurate and comprehensive energy monitoring system, as well as the availability and completeness of all data relating to the building's construction, plant, and usage characteristics, to ensure consistent modelling during the simulation phase. The barriers to the widespread adoption of the proposed methodology relate to the availability of expertise, particularly in less structured organisations such as SMEs, and to the costs of implementing the digital infrastructure.

The proposed framework contributes not only to improving companies' environmental performance but also to the 2030 Agenda's objectives regarding clean energy, industrial innovation, responsible production, and climate action; it also highlights the need to move beyond the current trade-off with the aim of reducing inequalities – arising from the technological and skills gap between large enterprises and SMEs – by promoting wider access to digital innovation. The stakeholders of interest in this study range from managers responsible for companies' sustainable transition (Zannoni et alii, 2024) to policymakers. Further research could involve applying the methodology to a broader range of case studies and integrating digital twins with advanced simulation and predictive-analysis tools to strengthen the role of data in sustainability-oriented decision-making.

References

Azzalin, M. (2024), "Indicatore Smart Readiness per l'edilizia – Asset digitali per la transizione energetica | Smart Readiness for buildings – Digital asset for energy transition", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design,* vol. 15, pp. 148-159. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/15112024 [Accessed 4 April 2026].

Ba, L., Tangour, F., El Abbassi, I. and Absi, R. (2025), "Analysis of Digital Twin Applications in Energy Efficiency – A Systematic Review", in *Sustainability*, vol. 17, issue 8, article 3560, pp. 1-33. [Online] Available at: doi.org/10.3390/su17083560 [Accessed 4 April 2026].

Baiani, S., Altamura, P., Turchetti, G. and Romano, G. (2024), "Transizione energetica e circolare del patrimonio industriale – Il caso dell'ex SNIA a Roma | Energy and circular transition of the industrial heritage – The Ex SNIA case in Rome", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 15, pp. 190-203. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/15152024 [Accessed 4 April 2026].

Barbero, S. and Ferrulli, E. (2023), "Transizione ecologica e digitale – Il Design Sistemico nei processi di innovazione aperta delle PMI | Ecological and digital transition

– Systemic Design in SMEs open innovation processes", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 13, pp. 269-280. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/13232023 [Accessed 4 April 2026].

Bazzocchi, F., Moscarelli, S., Bellini, G., Borgarello, M., Zagano, C., Maggiore, S., Meroni, F. M. and Bernante, R. (2023), *Le opportunità della decarbonizzazione nel settore manifatturiero e agroalimentare*. [Online] Available at: rse-web.it/rapporti/le-opportunita-della-decarbonizzazione-nel-settore-manifatturiero-e-agroalimentare/ [Accessed 4 April 2026].

CIBSE – Chartered Institution of Building Services Engineers (2020), *TM63 – Operational performance: Building performance modelling and calibration for evaluation of energy in-use*. [Online] Available at: cibse.org/knowledge-research/knowledge-portal/operational-performance-building-performance-modelling-and-calibration-for-evaluation-of-energy-in-use-tm63 [Accessed 4 April 2026].

D'Amore, A. E. (2025), "Gemello digitale e processo edilizio – Riflessioni su produttività, energia e salute | The digital twin and the building process – Reflections on productivity, energy, and health", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 18, pp. 144-161. [Online] Available at: doi.org/10.69143/2464-9309/1872025 [Accessed 4 April 2026].

EMF – Ellen MacArthur Foundation (2013), *Towards the circular economy – Vol. 1 – An economic and business rationale for an accelerated transition*. [Online] Available at: ellenmacarthurfoundation.org/towards-the-circular-economy-vol-1-an-economic-and-business-rationale-for-an [Accessed 4 April 2026].

ENEA – Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia e lo sviluppo economico sostenibile (2021), *La Diagnosi Energetica ai sensi dell'Art. 8 del D.Lgs. 102/2014 e s.m.i. – Linee Guida e Manuale Operativo – La clusterizzazione dei siti, il rapporto di diagnosi ed il piano di monitoraggio*, ENEA, Roma. [Online] Available at: efficienza energetica.enea.it/download/category/41-diagnosi-energetiche.html [Accessed 4 April 2026].

European Commission (2020), *Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions – A new Circular Economy Action Plan For a cleaner and more competitive Europe*, document 52020DC0098, COM/2020/98 final. [Online] Available at: eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52020DC0098 [Accessed 4 April 2026].

European Commission (2019), *Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions – The European Green Deal*, document 52019DC0640, COM/2019/640 final. [Online] Available at: eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52019DC0640&qid=1768067091625 [Accessed 4 April 2026].

European Parliament and the Council of the European Union (2012), *Directive 2012/27/EU of the European Parliament and of the Council of 25 October 2012 on energy efficiency, amending Directives 2009/125/EC and 2010/30/EU and repealing Directives 2004/8/EC and 2006/32/EC Text with EEA relevance*, document 32012L0027. [Online] Available at: eur-lex.europa.eu/eli/dir/2012/27/oj/eng [Accessed 4 April 2026].

Giner Santonja, G., Panagiotis, K., Stubdrup, K. R., Brinkmann, T. and Roudier, S. (2019), *Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Food, Drink and Milk Industries – Industrial Emissions Directive 2010/75/EU (Integrated Pollution Prevention and Control)*, Publications Office of the European Union, Luxembourg. [Online] Available at: data.europa.eu/doi/10.2760/243911 [Accessed 4 April 2026].

Gobbi, M. E., Maggiore, S., Realini, A. and Zagano, C. (2021), *L'industria efficiente – Le opportunità delle imprese nella transizione energetica*, Editrice Alkes, Milano. [Online] Available at: rse-web.it/prodotti_editoriali/rse-m-efficienza-industria/ [Accessed 4 April 2026].

Green Building Council Italia (2024), *Smart Building – La digitalizzazione per il Net Zero*. [Online] Available at: gbcitalia.org/public_documents/GBCItalia_PositionPaper_BACS-BEMS_WEB.pdf [Accessed 4 April 2026].

ISO – International Organization for Standardization (2024), *ISO 59004:2024 – Circular economy – Vocabulary, principles and guidance for implementation*. [Online] Available at: iso.org/standard/80648.html [Accessed 4 April 2026].

ISO – International Organization for Standardization (2018), *ISO 14067:2018 – Greenhouse gases – Carbon footprint of products – Requirements and guidelines for quantification*. [Online] Available at: iso.org/standard/71206.html [Accessed 4 April 2026].

Lauria, M., Azzalin, M., Giglio, F. and La Face, G. M. (2025), "Efficienza energetica e smartness degli edifici nelle politiche ambientali pubbliche | Energy efficiency and smart buildings in public environmental policies", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 18, pp. 264-275. [Online] Available at: doi.org/10.69143/2464-9309/18152025 [Accessed 4 April 2026].

Longo, D. and Roversi, R. (2025), "La modellazione energetica della città e il Gemello Digitale Urbano – City Energy Modelling and Urban Digital Twins", in Boulanger, S. O., Longo, D. and Massari, M. (eds), *Energia e città – Pratiche e traiettorie per la decarbonizzazione*, FrancoAngeli, Milano, pp. 153-166. [Online] Available at: hdl.handle.net/11585/1040984 [Accessed 4 April 2026].

Longo, D., Turillazzi, B., Roversi, R., Lilla, L., Nucci, C. A., Piccinini, A. and Costa, A. (2024), "Gemello digitale urbano e modellazione energetica – Esperienze e analisi di casi d'uso | Urban Digital Twin and Energy Modeling – Experiences and case study analyses", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 15, pp. 160-169. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/15122024 [Accessed 4 April 2026].

Losco, G., Pasqualini, C. and Khodaparast, M. J. (2024), "Rivitalizzare le comunità rurali – Autosufficienza energetica e valorizzazione delle risorse boschive locali | Revitalising rural communities – Energy self-sufficiency and valorisation of local forest resources", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 16, pp. 174-185. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/16142024 [Accessed 4 April 2026].

Ministero dello Sviluppo Economico (2017), *Circolare n.4/E del 30/03/2017*. [Online] Available at: agenziaentrate.gov.it/portale/documents/20143/297931/Circolare+n.4+del+30032017_CIRCOLARE+n.4_E+del+30-03-2017.pdf/787f819a-d9aa-6a16-a03f-056a31a8edb1?t=1490899075261 [Accessed 4 April 2026].

Ministero dello Sviluppo Economico (2016), *Chiarimenti in materia di diagnosi energetica nelle imprese ai sensi dell'articolo 8 del decreto legislativo n. 102 del 2014*. [Online] Available at: mase.gov.it/portale/documents/d/guest/chiarimenti-diagnosi-14-nov-2016-pdf [Accessed 4 April 2026].

Osello, A., Del Giudice, M., Donato, A. J. and Fratto, A. (2024), "Verso la Neutralità Climatica – Il ruolo chiave del Digital Twin nell'Industria 5.0 | Towards Climate Neutrality – The key role of the Digital Twin in Industry 5.0", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 15, pp. 276-285. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/15222024 [Accessed 4 April 2026].

Paganin, G., Talamo, C., Atta, N. and Tinelli, E. (2024), "Riuso di componenti edilizi – Sistema di valutazione a supporto delle decisioni negli interventi di ridistribuzione interna | Reuse of building components – Assessment system to support decisions in indoor re-layout interventions", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 15, pp. 266-275. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/15212024 [Accessed 4 April 2026].

Realini, A., Nsangwe, C., Businge, F., Bazzocchi, M., Borgarello, M., Gobbi, M. and Maggiore, S. (2017), *L'efficienza energetica nell'industria – Potenzialità di risparmio energetico e impatto sulle performance e sulla competitività delle imprese*. [Online] Available at: rse-web.it/rapporti/18001189/ [Accessed 4 April 2026].

Presidente della Repubblica Italiana (2014), "Decreto legislativo 4 luglio 2014, n. 102 – Attuazione della direttiva 2012/27/UE sull'efficienza energetica", in *Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana*, Serie Generale n. 165 del 18/07/2014. [Online] Available at: gazzettaufficiale.it/eli/id/2014/07/18/14G00113/sg [Accessed 4 April 2026].

Rigillo, M., Galluccio, G. and Paragliola, F. (2023), "Digitale e circolarità in edilizia – Le KETs per la gestione degli scarti in UE | Digital and circularity in building – KETs for waste management in the European Union", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 13, pp. 247-258. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/13212023 [Accessed 4 April 2026].

Russo Ermolli, S. (2019), "La digitalizzazione dei flussi informativi per la fase operative – Il caso della Apple Developer Academy | Digital flows of information for the operational phase – The Facility Management of Apple Developer Academy", in *Techne | Journal of Technology for Architecture and Environment*, vol. 18, pp. 235-245. [Online] Available at: doi.org/10.13128/techne-7535 [Accessed 4 April 2026].

Sposito, C. and De Giovanni, G. (2023), "Affrontare la complessità – Integrare LCA, ERA ed ESA per valutare impatti e benefici antropici sulla biosfera | Dealing with complexity – Integrating LCA, ERA and ESA to assess human impacts and benefits on the biosphere", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 14, pp. 12-39. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/1412023 [Accessed 4 April 2026].

The European House Ambrosetti (2023), *Il ruolo delle soluzioni energetiche integrate per la competitività delle imprese italiane*. [Online] Available at: ambrosetti.eu/scenario-energia/soluzioni-energetiche-competitivita-imprese/ [Accessed 4 April 2026].

Trevisan, A. H., Lobo, A., Guzzo, D., de Vasconcelos Gomes, L. A. and Mascarenhas, J. (2023), "Barriers to employing digital technologies for a circular economy – A multi-level perspective", in *Journal of Environmental Management*, vol. 332, article 117437, pp. 1-13. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.117437 [Accessed 4 April 2026].

UN – United Nations (2015), *Transforming our World – The 2030 Agenda for Sustainable Development*, document A/RES/70/1. [Online] Available at: sustainabledevelopment.un.org/index.php?page=viewandtype=111andnr=8496andmenu=35 [Accessed 4 April 2026].

UNEP – United Nations Environment Programme (2011), *Decoupling Natural Resource Use and Environmental Impacts from Economic Growth*, UNEP, Nairobi. [Online] Available at: wedocs.unep.org/handle/20.500.11822/9816 [Accessed 4 April 2026].

UNI – Ente Italiano di Normazione (2022a), *UNI CEI EN 16247-1:2022 – Energy audits – Part 1 – General requirements*. [Online] Available at: store.uni.com/en/uni-cei-en-16247-1-2022 [Accessed 4 April 2026].

UNI – Ente Italiano di Normazione (2022b), *UNI/TS 11820:2022 – Measuring circularity – Methods and indicators for measuring circular processes in organizations*. [Online] Available at: store.uni.com/en/uni-ts-11820-2022 [Accessed 4 April 2026].

Zannoni, M., Succini, L., Rosato, L. and Pasini, V. (2024), "Transitional industrial designer – La responsabilità di progettisti e imprese per una transizione sostenibile | Transitional industrial designer – The responsibility of designers and companies for a sustainable transition", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 15, pp. 332-343. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/15282024 [Accessed 4 April 2026].

ARCHITECTURE
Research & Experimentation

AGATHÓN – International Journal of Architecture, Art and Design | n. 19 | 2026 | pp. 228-245
ISSN print: 2464-9309 – ISSN online: 2532-683X | doi.org/10.69143/2464-9309/19132026

Article Info

Received 11 March 2026
Revised 21 April 2026
Accepted 24 April 2026
Published 30 June 2026

PARTI REVERSIBILI DELL'ABITARE
Atlante Digitale per la rigenerazione incrementale dell'Edilizia Residenziale Pubblica

SOFT PARTS OF LIVING
Digital Atlas for the incremental regeneration of Public Residential Housing

Spartaco Paris, Carlo Vannini

Abstract

Il contributo propone una metodologia per la rigenerazione incrementale dell'edilizia residenziale pubblica romana realizzata con processi industrializzati e componenti prefabbricati, assumendo il digitale come infrastruttura di conoscenza e non come semplice strumento rappresentativo. Muovendo da una ricerca dottorale sul primo PEEP di Roma lo studio costruisce un Atlante Digitale, una matrice decisionale e un abaco operativo per rendere leggibili criticità, priorità e compromessi delle trasformazioni. Il lavoro mostra come questo Patrimonio costruito si presti a trasformazioni diverse e calibrate caso per caso, a partire dai caratteri, dai bisogni dell'abitare e dai vincoli gestionali. Rigenerare non significa conservare per inerzia, né adeguare soltanto sul piano prestazionale, ma restituire abitabilità attraverso un progetto capace di distinguere tra ambiente, tecnica e società.

The contribution proposes a methodology for the incremental regeneration of Roman public housing, realised through industrialised processes and prefabricated components, understanding digital technologies as a knowledge infrastructure rather than a mere representative tool. Starting from doctoral research on the first PEEP in Rome, the study constructs a Digital Atlas, a decision matrix, and an operational abacus to make the critical issues, priorities, and compromises of transformation legible. The work shows how this built heritage lends itself to different transformations calibrated on a case-by-case basis, on the basis of constructional characteristics, housing needs, and management constraints. Regenerating does not mean preserving through inertia, nor adapting only in terms of performance, but restoring habitability through a project capable of distinguishing between environment, technology, and society.

Keywords

edilizia residenziale pubblica, atlante digitale, rigenerazione adattiva, prefabbricazione, parti reversibili

public housing, digital atlas, adaptive regeneration, prefabrication, soft parts

Spartaco Paris, Architect and PhD, is a Professor of Architectural Technology at the 'Sapienza' University of Rome (Italy). He directs the CITERA Centre and has taught at numerous Italian and international Universities, including Politecnico di Milano, UPC Barcelona, TU Eindhoven, KU Leuven, and East China Normal University. He is the co-founder of the start-up BEST Design and works on technological innovation, design, and the built environment. E-mail: spartaco.paris@uniroma1.it

Carlo Vannini, Architect and PhD, is a Postdoctoral Research Fellow at the 'Sapienza' University of Rome (Italy). His research activity concerns technological innovation applied to the redevelopment and conservation of modern and post-war architectural heritage, with a focus on public housing and urban quality. He works with advanced methodologies and tools for design and construction processes to support the digital transformation of the construction sector. He is a partner of BEST Design, a start-up from 'Sapienza' University of Rome, which develops projects to support the construction industry through digital systems. E-mail: carlo.vannini@uniroma1.it

L'impatto dei cambiamenti climatici, l'aumento del costo dell'energia e la crescente fragilità sociale delle periferie impongono una revisione profonda dei modelli con cui intervenire sul patrimonio costruito del secondo Novecento (Bologna, 2021). In questo quadro la rigenerazione dell'Edilizia Residenziale Pubblica (ERP) italiana non può essere ridotta a un semplice problema di efficientamento energetico, né affrontata attraverso pacchetti standardizzati di retrofit (Ginelli and Castiglioni, 2012). I complessi realizzati nella stagione sviluppatasi a Roma tra gli anni Settanta e Ottanta dello scorso secolo (Maldonado, 1978), fortemente caratterizzata da un approccio industriale al cantiere e dall'impiego di sistemi prefabbricati (Figg. 1, 2), includono criticità tecniche, questioni gestionali, rigidità tipologiche e vulnerabilità sociali che richiedono dispositivi di conoscenza più articolati (Di Giorgio, 2011). In linea con gli Obiettivi di Sviluppo Sostenibile (SDG) n. 9 e n. 10 il contributo assume tali quartieri come infrastrutture sociali: quando essi degradano o non risultano più adeguati agli usi contemporanei, le disuguaglianze si amplificano attraverso esposizioni differenziali al disagio termico, alla povertà energetica, alle barriere di accessibilità e alla perdita di qualità d'uso degli spazi intermedi e collettivi (Cangelli, 2025).

Il contributo si fonda su una ricerca dottorale dedicata al rinnovo sostenibile dell'edilizia pubblica romana e adotta come laboratorio il Patrimonio industrializzato del primo Piano di Edilizia Economica e Popolare della Città di Roma. Il punto di partenza è un disallineamento ricorrente: gli interventi sul Patrimonio ERP prefabbricato sono spesso definiti attraverso misure tecniche settoriali che trascurano le logiche costruttive originarie, le trasformazioni stratificate prodotte da decenni di manutenzione e di adattamenti d'uso nonché i vincoli socio-tecnici tipici della gestione pubblica: ne consegue che le scelte progettuali risultano spesso opache, difficilmente comparabili e poco trasferibili (Paris and Bianchi, 2018).

Da qui l'ipotesi di lavoro: un rinnovo efficace ed equo non può essere inteso come mera somma di tecnologie, ma richiede un'infrastruttura di conoscenza capace di rendere espliciti sistemi, vulnerabilità, margini di trasformazione, priorità e compromessi (Picon, 2010). Il contributo persegue tre obiettivi: definire un protocollo di conoscenza e decisione per la rigenerazione incrementale dell'Edilizia Residenziale Pubblica industrializzata; mostrarne la traduzione in Atlante Digitale, matrice decisionale e abaco operativo; verificarne la pertinenza su un insieme di casi del primo Piano di Edilizia Economica e Popolare di Roma, assunto come campo di prova per una metodologia trasferibile. In questo senso, le 'parti reversibili'[1] dell'edificio, vale a dire componenti non strutturali, aggiornabili e a vita utile più breve che consentono di produrre benefici significativi con impatti di cantiere compatibili con budget limitati e occupazione continua (Habraken, 1999), costituiscono un ambito privilegiato di intervento.

Il contributo è articolato in sei passaggi: stato dell'arte; metodologia e fasi operative; caso studio romano; risultati; governance, barriere e trasferibilità; riflessione su sinergie e compromessi rispetto agli SDG 9 e 10 dell'Agenda 2030. L'interesse del contributo risiede nella possibilità di esplicitare un protocollo replicabile anche al di là del caso romano, utile per Patrimoni ERP comparabili.

Stato dell'arte e casi di riferimento | La rigenerazione del Patrimonio abitativo del secondo Novecento è oggi attraversata da una doppia tensione (Migotto and Tattara, 2023): vi è da un lato l'urgenza ambientale che impone di ridurre consumi energetici, emissioni e uso di risorse, dall'altro la necessità di evitare che la transizione ecologica produca nuove esclusioni, attraverso interventi costosi, invasivi o incompatibili con la permanenza degli abitanti (Battaino, Fossati and Marconi, 2025).

In molti contesti europei il Patrimonio di Edilizia Residenziale Pubblica e collettiva del secondo Novecento, soprattutto quello realizzato con tecniche industrializzate e componenti prefabbricati, presenta ricorrenze tecnologiche e vulnerabilità note: pannelli prefabbricati, nodi e giunti critici, ponti termici, serramenti obsoleti, carenze di ventilazione e scarsa accessibilità alla manutenzione (Block and Ruggiero, 2023). Tuttavia il ricorso a soluzioni di retrofit 'a catalogo' mostra tutti i suoi limiti quando non considera il carattere situato dei problemi, la storia manutentiva dei manufatti e i vincoli della gestione pubblica (Boughton, 2023).

All'interno del dibattito europeo le strategie di intervento tendono a oscillare tra approcci conservativi e trasformativi (Jessen and Schneider, 2006): i primi mirano a preservare l'identità architettonica dell'edificio, migliorandone le prestazioni e il comfort, mentre i secondi riscrivono in modo più marcato gli involucri, le soglie, gli spazi intermedi e le relazioni con il suolo. In entrambi i casi i progetti più rilevanti mostrano come la riqualificazione dell'ERP non sia riducibile a un problema energetico, ma coinvolga il rapporto tra interno ed esterno, tra spazio individuale e collettivo, tra edificio e quartiere (Plevoets and Van Cleempoel, 2019). Il tema dell'abitare si intreccia così con quelli della permanenza, dell'accessibilità economica, della gestione del cantiere e dell'uso quotidiano (Graf and Marino, 2016).

In questa prospettiva risultano particolarmente interessanti alcuni casi europei recenti selezionati sulla base di quattro criteri: appartenenza a contesti comparabili a quello italiano; riferimento a edifici del secondo Novecento; presenza di tecnologie industrializzate o prefabbricate; rilevanza rispetto al rapporto tra conservazione, trasformazione e abitabilità (Ciorra and Marini, 2011). La comparabilità non è fondata sulla mera somiglianza formale tra gli edifici ma sulla ricorrenza di alcune condizioni: serialità costruttiva, vulnerabilità prestazionali, presenza di componenti ripetitive, necessità di contenere costi e livelli di interferenza del cantiere, permanenza degli abitanti durante almeno una parte del processo di trasformazione. La selezione non intende costruire un repertorio esaustivo, ma individuare esperienze capaci di mostrare come la trasformazione del Patrimonio residenziale moderno si misuri con il problema della continuità d'uso, con la qualità dello spazio intermedio e con il rapporto tra miglioramento prestazionale e ridefinizione dell'abitare (Guidetti, 2025).

De Flat Kleiburg ad Amsterdam (Paesi Bassi), su progetto di NL Architects, costituisce un esempio di intervento conservativo che evita la demolizione valorizzando la struttura esistente e introducendo un modello di trasformazione a bassa soglia economica. Park Hill a Sheffield (Regno Unito) mostra invece l'ambivalenza di processi di riqualificazione capaci di restituire qualità architettonica a un grande complesso modernista ma anche di produrre effetti selettivi sul piano sociale. Le Torri di Madonna Bianca a Trento (Italia) rappresentano un caso rilevante di aggiornamento prestazionale e manutentivo di un Patrimonio prefabbricato italiano. I casi di Génicart a Lormont (Francia) e di Ellebo Garden Room a Ballerup (Danimarca) evidenziano infine come gli interventi trasformativi possano agire su logge, facciate, spazi intermedi e suolo per migliorare comfort e qualità relazionale dell'abitare (Druot, Lacaton and Vassal, 2007).

Dal confronto con queste esperienze emergono tre aspetti: il primo è che la qualità dell'intervento non dipende solo dalla profondità tecnica del retrofit, ma anche dalla capacità di costruire scenari coerenti con il carattere costruttivo dell'edificio e con le condizioni d'uso reali; il secondo è che l'efficacia sociale della rigenerazione non è automatica, poiché anche un buon progetto può produrre come esito l'esclusività se non governa correttamente accessibilità economica, tempi, disagi e permanenza degli abitanti (Secchi, 2013); il terzo è che manca, in molti casi, una vera infrastruttura di conoscenza sul componente edilizio, in grado di tradurre analisi, criticità e obiettivi in decisioni tracciabili e comparabili. Ciò comporta alcune variabili assunte nella costruzione della matrice decisionale, tra cui invasività del cantiere, compatibilità con la continuità d'uso, impatto sulle prestazioni ambientali, effetti sulla qualità spaziale e relazionale, manutenibilità, sostenibilità economica, robustezza gestionale e replicabilità delle soluzioni (Paganin et alii, 2024). È in questo passaggio che il presente contributo colloca la propria proposta metodologica, la cui originalità risiede nell'intreccio tra oggetto, metodo, strumento ed esito operativo.

Metodologia e fasi operative | La ricerca pone una domanda duplice: quali caratteristiche del Patrimonio ERP industrializzato condizionano la sua trasformabilità e quali strategie possono migliorarne le prestazioni e l'abitabilità, restando compatibili con il contesto urbano, sociale e gestionale? Per rispondere la ricerca definisce una metodologia articolata in tre fasi, concepita per essere ripetibile in contesti comparabili. L'impostazione adotta un approccio del tipo research-by-design[2], in cui la costruzione della conoscenza, l'interpretazione critica del costruito e la definizione di scenari progettuali procedono in modo integrato, senza separare rigidamente analisi e progetto (Ortega, 2017).

La prima fase consiste nella costruzione della base conoscitiva che comprende la digitalizzazione e la rilettura critica di archivi progettuali, relazioni tecniche, elaborati esecutivi, documentazione fotografica e materiali prodotti dagli Enti gestori; la ricostruzione delle logiche costruttive originarie; la mappatura delle alterazioni intervenute nel tempo; la ricognizione dei cicli manutentivi, dei guasti ricorrenti e delle pratiche d'uso (Graf, 2014). In questa fase non si tratta soltanto di 'raccogliere dati' ma di costruire una nomenclatura stabile dei sistemi, sottosistemi, componenti e nodi, capace di costituire la base comune per le fasi successive. L'obiettivo non è quindi la semplice restituzione documentaria del Patrimonio esistente ma la costruzione di una struttura informativa interrogabile, utile a mettere in relazione i caratteri costruttivi, le vulnerabilità ricorrenti e i margini di trasformazione. Nel caso romano tale base è stata costruita a partire da un insieme integrato di fonti documentarie, rilievi diretti, documentazione fotografica e materiali relativi a interventi recenti o programmati.



Fig. 1 | Torrevecchia (Rome, around 1980): the building site and the tunnel formwork construction system (source: Archivio Studio Passarelli).

La seconda fase traduce le evidenze raccolte in ricostruzioni digitali e in librerie parametriche di componenti. Il rilievo geometrico e materico, integrato con controlli diagnostici mirati, consente di verificare le consistenze, le discontinuità, l'accessibilità alla manutenzione e le principali criticità prestazionali. Una particolare attenzione è dedicata agli elementi più esposti all'obsolescenza, tra cui le chiusure verticali, i serramenti, le logge, le schermature, gli spazi di soglia, le parti impiantistiche accessibili, i sistemi di distribuzione e gli spazi comuni. Parallelamente vengono effettuate verifiche mirate sul comfort termo-igrometrico, sulla ventilazione, sull'illuminazione naturale, sull'accessibilità e sulla qualità d'uso, così da evitare che il modello digitale resti un mero supporto rappresentativo.

In questa fase il modello digitale non coincide con un'unica operazione di rilievo o di rappresentazione ma assume il ruolo di dispositivo interpretativo e comparativo, attraverso il quale i dati raccolti vengono selezionati, organizzati e messi in relazione con possibili famiglie di intervento (Picon, 2022). È in questo passaggio che l'approccio del tipo research-by-design diventa operativo: il progetto non compare solo come esito finale ma come strumento di verifica intermedia, utile a testare la pertinenza delle informazioni raccolte e a orientarne la lettura in chiave trasformativa (Osello et alii, 2024).

La terza fase riguarda l'assemblaggio e il confronto tra scenari incrementali. A partire dalla struttura basata sul componente edilizio definita nelle prime due fasi, vengono sviluppati e testati pacchetti di intervento su un insieme di casi selezionati. Tali scenari sono comparati attraverso una matrice decisionale (Tab. 1) che mette in relazione benefici e vincoli: miglioramento energetico e di comfort, riduzione delle barriere d'uso, fattibilità tecnica, compatibilità con la continuità d'uso, manutenibilità, impatti di cantiere, requisiti di approvvigionamento. L'esito non è un 'progetto unico', ma un sistema di opzioni argomentate e comparabili. La comparazione tra scenari non mira dunque a identificare una soluzione ottimale in astratto, bensì a rendere espliciti i criteri con cui le diverse opzioni vengono valutate, evidenziandone le convergenze, le tensioni e i compromessi.

La replicabilità del metodo risiede nella chiarezza delle sue unità operative e dei criteri con cui gli scenari vengono confrontati: base dati, tassonomia, ricostruzione digitale, verifica delle criticità, comparazione tramite matrice, traduzione in abaco. Gli input comprendono fonti d'archivio progettuali e manutentive, rilievi geometrici e materici, documentazione fotografica, riscontri in situ su nodi e componenti ricorrenti e dati relativi a condizioni d'uso, accessibilità, comfort e gestione. Tali informazioni sono ricondotte a una struttura classificatoria articolata in sistemi, sottosistemi, componenti e nodi, assunta come base comune per la lettura comparativa dei casi e per il popolamento dell'Atlante Digitale. L'affidabilità delle evidenze è invece garantita dalla triangolazione tra fonti d'archivio, rilievi in situ e controlli di consistenza su componenti e nodi ricorrenti. Quanto alla validazione la metodologia distingue una validazione ex ante – basata su verifiche prestazionali, coerenza tra fonti, classificazione e costruzione degli scenari – e una validazione ex post, ancora da implementare sistematicamente, fondata su monitoraggio dei consumi reali, valutazioni post-occupazione, registri di manutenzione, segnalazioni d'uso e questionari di comfort: la metodologia definisce un processo potenzialmente reiterabile, nel quale produzione dei dati, formulazione degli scenari e verifica dei risultati possono essere progressivamente aggiornate.

Il caso di studio: il primo PEEP di Roma come laboratorio | Il primo Piano di Edilizia Economica e Popolare di Roma[3] costituisce un laboratorio particolarmente significativo per sperimentare il protocollo descritto. La sua rilevanza dipende dalla scala e dalla combinazione di quattro condizioni: 1) diffusione di sistemi industrializzati e prefabbricati; 2) ricorrenza di problemi manutentivi e prestazionali; 3) presenza di variazioni tipologiche sufficienti a testare la trasferibilità interna del metodo; 4) persistenza di vincoli tipici della gestione ERP, come l'occupazione continua, le risorse limitate e la frammentazione dei cicli di manutenzione. Il primo PEEP romano consente di osservare, entro un medesimo contesto istituzionale e amministrativo, una pluralità di configurazioni edilizie e insediative (Fig. 3) che rendono possibile il confronto tra casi differenti senza compromettere la coerenza del campo di analisi (Dell'Acqua and Sansò, 2022).

L'attenzione si concentra in particolare sul Patrimonio costruito negli anni Settanta, periodo in cui la serializzazione costruttiva e la prefabbricazione diventano strumenti essenziali per produrre rapidamente grandi quantità di alloggi. Se tali scelte hanno consentito un'accelerazione senza precedenti dei tempi di realizzazione hanno anche generato rigidità distributive, criticità nei nodi di facciata, scarsa adattabilità nel tempo e vulnerabilità prestazionali oggi evidenti (Figg. 4, 5). La compresenza di logiche ripetitive e di varianti locali rende il caso romano particolarmente adatto a verificare un'impostazione basata sulla scomposizione in sistemi, sottosistemi, componenti e nodi, evitando sia generalizzazioni astratte sia letture esclusivamente monografiche (Fig. 6).

La selezione dei casi studio segue criteri dichiarati: disponibilità di fonti e rilievi; significatività tipologica; presenza di sistemi prefabbricati o industrializzati; interesse rispetto a trasformazioni in atto o programmate. A tali criteri si affianca la volontà di includere casi in grado di restituire condizioni differenti di conservazione, di accessibilità delle informazioni e di livelli di trasformazione già intervenuti,

così da mettere alla prova la tenuta della metodologia in situazioni non perfettamente omogenee. In tale prospettiva il corpus analizzato include quartieri come Tor Bella Monaca, Vigne Nuove, Tiburtino Sud e Pineto, cui si affianca una sperimentazione su un edificio a torre nel quartiere di Torrevecchia (Fig. 7), utilizzata come caso applicativo per mettere alla prova pacchetti incrementali in presenza di ricorrenze costruttive e criticità d'uso. Questi quartieri non sono considerati episodi isolati ma campi di osservazione complementari, utili a verificare come la metodologia reagisca al variare delle configurazioni tipologiche, dei caratteri costruttivi e delle condizioni di manutenzione.

Particolare interesse assume il caso di Tor Bella Monaca perché consente di osservare come le scelte cambino lungo la transizione tra diversi livelli di progetto e tra differenti programmi di finanziamento, rendendo più leggibili i compromessi che emergono quando entrano in gioco vincoli di cantiere, di approvvigionamento e di gestione (Cellamare, 2016). Il caso di Torrevecchia è utilizzato invece in forma più propriamente sperimentale (Fig. 8), come banco di prova per verificare la costruzione di scenari incrementali su un organismo edilizio caratterizzato da elevata ricorrenza dei nodi e da una leggibile relazione tra componenti, criticità prestazionali e possibili famiglie di intervento.

L'uso del primo PEEP come laboratorio non implica che il contesto romano sia assunto come paradigma assoluto, al contrario il caso viene qui trattato come campo di verifica di un metodo che si fonda sulla distinzione tra aspetti generalizzabili e aspetti contestuali. Sono generalizzabili ad esempio la logica di scomposizione per sistemi, sottosistemi, componenti e nodi, l'attenzione alle parti reversibili, la costruzione di scenari comparabili e l'esplicitazione dei criteri decisionali. Restano invece fortemente contestuali la disponibilità di dati, l'assetto della governance, il quadro manutentivo degli Enti gestori, la forma delle vulnerabilità climatiche e il sistema locale dei costi. Rispetto a questi termini Roma è assunta come ambiente di verifica.

Risultati: Atlante Digitale, matrice decisionale e abaco operativo | Il principale esito della ricerca è un Atlante Digitale concepito non come repertorio descrittivo, ma come infrastruttura di conoscenza e di decisione (Figg. 9-11). Questo dispositivo si configura come una tassonomia dei casi studio e dei loro componenti ricorrenti, articolata in livelli informativi progressivi e finalizzata a rendere confrontabili criticità, margini di trasformazione e scenari di intervento.

Un primo livello restituisce il contesto: quartiere, tipologia, cronologia, condizioni d'uso, vincoli e opportunità; un secondo livello riguarda i sistemi principali di involucro, di distribuzione, degli spazi comuni, degli impianti e delle interfacce urbano-edificio; un terzo e un quarto livello puntano la lente su sottosistemi, componenti e nodi, codificando le stratigrafie, le criticità ricorrenti, l'accessibilità, i requisiti e i margini di trasformazione; un ultimo livello mette in relazione tali elementi con le opzioni di intervento, i prerequisiti, le dipendenze, le sequenze e i gradi di 'disruption'[4]. In questo modo risultano consultabili non solo i singoli edifici ma anche famiglie di componenti, patologie, obiettivi di progetto e scenari d'uso. Il suo carattere operativo risiede nella possibilità di passare, all'interno di una medesima struttura informativa, dalla descrizione del costruito alla selezione di ipotesi di intervento (Block, Perriccioli and Rossi-Schwarzenbeck, 2019).

Un secondo risultato riguarda la messa a fuoco delle parti reversibili come campo privilegiato di rigenerazione incrementale (Fig. 12); nel presente contributo esse comprendono serramenti e schermature, strati leggeri dell'involucro, logge e serre bioclimatiche, componenti di soglia, spazi intermedi, elementi di distribuzione e parti impiantistiche accessibili. Operare sulle parti reversibili consente infatti di intervenire sulle prestazioni e sulla qualità d'uso senza compromettere la struttura portante, allineando gli interventi ai cicli di manutenzione ordinaria, riducendo il livello di invasività del cantiere e rendendo possibili azioni progressive e reversibili, con benefici tangibili in termini di comfort, accessibilità e vivibilità degli spazi condivisi. Il risultato più rilevante consiste nell'averne verificato il ruolo di principale margine di trasformazione, compatibile con le condizioni operative tipiche dell'ERP: occupazione continua, risorse limitate, manutenzione progressiva e contenimento della 'disruption'.

Il terzo risultato è la definizione di una matrice decisionale che impedisce all'Atlante di restare un semplice strumento descrittivo. Ogni scenario viene comparato in base a criteri espliciti: benefici tecnici, qualità d'uso, accessibilità e sicurezza, fattibilità, impatti di cantiere, manutenibilità, compatibilità con la continuità d'uso; il valore della matrice non sta nell'automatizzare la decisione, ma nel rendere trasparenti i compromessi. Ad esempio emerge con chiarezza che la massimizzazione del beneficio energetico possa entrare in tensione con la minimizzazione del disagio di cantiere; oppure che la trasformazione dell'immagine dell'edificio possa migliorare alcuni aspetti d'uso ma generare problemi di costo, di manutenzione o di accettabilità gestionale. La matrice non sostituisce la scelta politica o tecnica ma la rende discutibile, argomentabile e comparabile.

Un quarto risultato è costituito dall'abaco operativo che traduce Atlante e matrice in pacchetti di intervento organizzati per fasi (Figg. 13, 14; Tab.

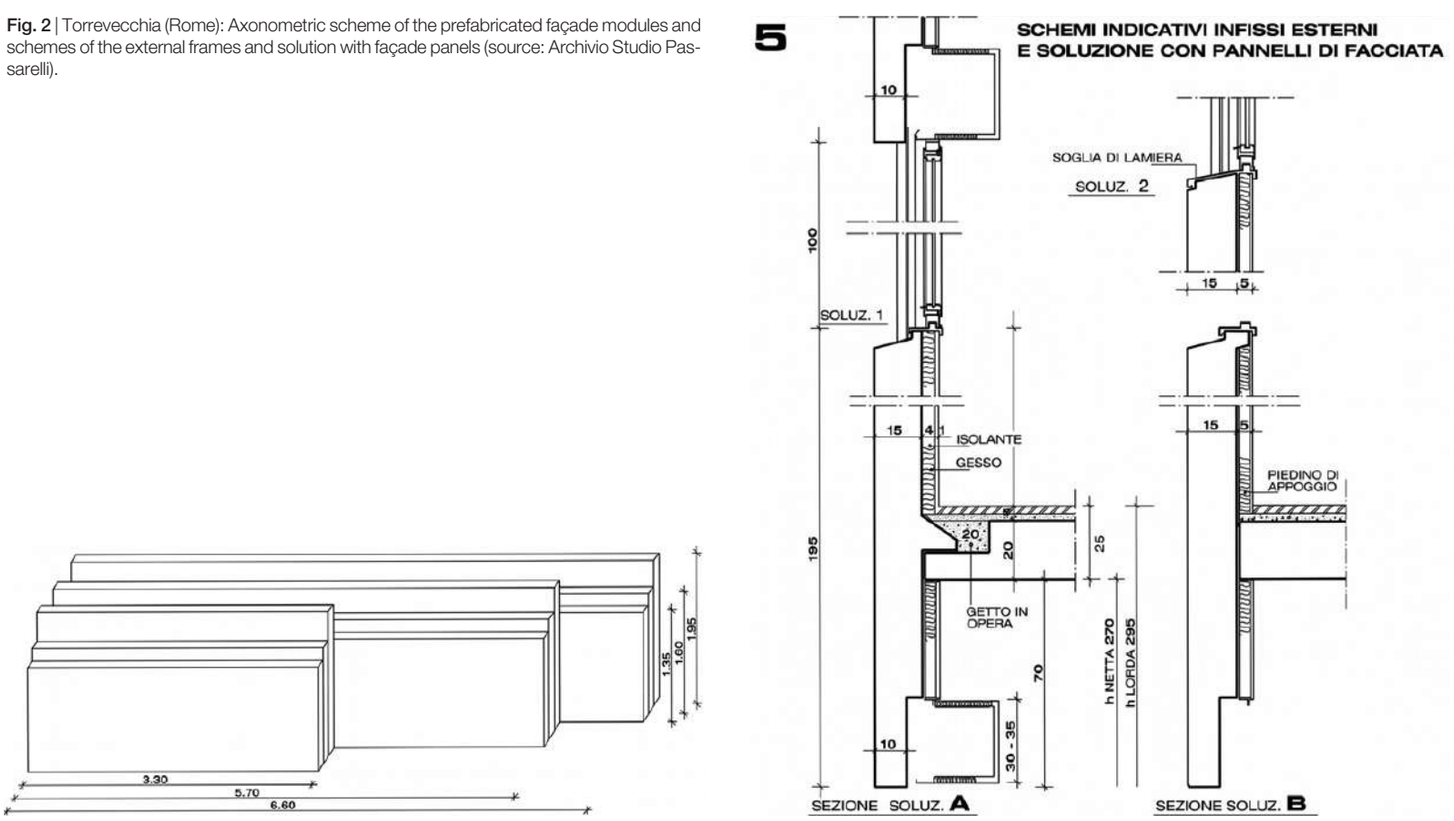


Fig. 2 | Torrevecchia (Rome): Axonometric scheme of the prefabricated façade modules and schemes of the external frames and solution with façade panels (source: Archivio Studio Passarelli).

Scenario	Main components involved	Technical and use-related benefits (+)	Technical feasibility (+)	Construction disruption (-)	Compatibility with continued occupancy (+)	Maintainability (+)	Procurement complexity (-)	Cost and programme impact (-)	Replicability (+)	Evidence base
S1 | Targeted soft-parts upgrade	Windows and external doors, solar-shading devices, threshold components, minor accessible building-services adjustments	3	5	1	5	4	2	2	5	Archival drawings, in-situ survey, recurring junction analysis
S2 | Intermediate environmental package	Windows and external doors, solar shading, loggias / bioclimatic buffer spaces, selected shared-space upgrades	4	3	3	4	3	3	3	4	Archival sources, survey, digital model, and scenario comparison
S3 | Advanced interface reconfiguration	Dry envelope retrofit, façade upgrades, intermediate spaces, circulation and shared-space reconfiguration	5	2	5	2	3	5	5	3	Archival sources, survey, and model-based scenario testing

Tab. 1 | Comparative decision matrix for incremental retrofit scenarios applied to soft parts in industrialised public housing. Legend: 1 = very low; 2 = low; 3 = medium; 4 = high; 5 = very high. Criteria direction: (+) higher values are preferable; (-) lower values are preferable. Nature of data: comparative expert assessment based on triangulation of archival sources, in situ survey, recurring component/junction analysis and digital scenario testing. Interpretive note: the matrix does not automate decision-making; it makes trade-offs explicit and comparable across scenarios (credit: the Authors, 2026).

2). Si possono così distinguere pacchetti minimi, orientati al comfort e alla riduzione della povertà energetica con bassa 'disruption', basati ad esempio su serramenti, schermature e microinterventi sulle soglie; pacchetti intermedi che integrano dispositivi bioclimatici e interventi sugli spazi comuni; pacchetti più avanzati che ridefiniscono in modo più profondo le interfacce, gli spazi intermedi e le relazioni con il suolo. L'abaco risulta utile anche in chiave di approvvigionamento perché chiarisce i prerequisiti, le sequenze, i requisiti prestazionali minimi, le parti replicabili e le parti specifiche. Esso rappresenta la traduzione più operativa e applicabile dell'intero percorso di ricerca (Fig. 15) poiché mette in relazione criteri progettuali, l'intensità dell'intervento e le condizioni di fattibilità, offrendo una base utile alla progettazione, alla programmazione e alla gestione degli interventi.

Nel complesso i risultati mostrano che la rigenerazione di questo stock immobiliare, in larga parte costruito secondo logiche prefabbricate e industrializzate, non richiede necessariamente interventi totali per essere efficace (Lepratto, 2024). Decisiva appare la capacità di costruire un quadro conoscitivo che colleghi vulnerabilità ricorrenti e margini di trasformazione a opzioni tecniche compatibili con le risorse, i tempi e la gestione reale. L'efficacia dell'intervento dipende meno dalla sua radicalità astratta che dalla possibilità di calibrare scenari progressivi, comparabili e argomentati, nei quali benefici attesi, limiti operativi e compromessi risultino espliciti (Reichlin and Pedretti, 2011).

Governance, barriere e trasferibilità | Uno dei punti più delicati del dibattito contemporaneo sulla rigenerazione dell'ERP riguarda il rapporto tra la qualità tecnica dell'intervento e quella del processo decisionale che lo genera. Nel caso in esame l'Atlante e la matrice non hanno senso se non come dispositivi capaci di connettere conoscenza tecnica, gestione pubblica e bisogni d'uso. Per tale motivo il protocollo attribuisce un ruolo decisivo ai soggetti coinvolti (ricercatori, progettisti, enti gestori, strutture tecniche, amministrazioni e abitanti), il cui coinvolgimento non è concepito in forma genericamente partecipativa, ma per la co-definizione progressiva dei criteri e dei pesi con cui gli scenari vengono valutati. In particolare la possibilità di integrare nel processo variabili legate a discomfort, accessibilità, uso degli spazi intermedi o tollerabilità del cantiere consente di attribuire un contenuto concreto alla nozione di equità.

L'applicazione del protocollo rende tuttavia evidenti anche alcuni limiti della ricerca, che riguardano soprattutto il campione, la disponibilità disomogenea dei dati, la scala di indagine e il carattere ancora prevalentemente ex ante della validazione, oltre a una serie di barriere che ostacolano la diffusione di approcci incrementali basati sulla conoscenza. Vi sono innanzitutto barriere culturali, legate alla persistenza di una visione del retrofit come risposta tecnico-normativa standardizzata; vi sono poi barriere economiche e amministrative che tendono a privilegiare misure facilmente contabilizzabili o allineate a strumenti di finanziamento settoriali, penalizzando interventi più integrati ma anche più difficili da incasellare.

A queste si aggiungono barriere tecniche dovute alla frammentazione delle informazioni, all'assenza di rilievi sistematici, alla discontinuità dei registri manutentivi e alla difficoltà di mettere in relazione gli archivi storici, lo stato di fatto e la progettazione contemporanea. Infine esistono barriere normative e procedurali che spesso non premiano la costruzione di pacchetti progressivi e manutenibili, né la possibilità di aggiornare nel tempo la base conoscitiva, cui si sommano difficoltà sociali e gestionali nel coinvolgere gli abitanti nella definizione delle priorità e dei livelli accettabili di 'disruption' (Nelson and Schneider, 2019).

Quanto alla trasferibilità il contributo sostiene che il protocollo può essere esteso ad altri contesti europei comparabili a tre condizioni: la prima è che si lavori su Patrimoni con ricorrenze costruttive sufficientemente leggibili da poter essere ricodificate per sistemi, sottosistemi, componenti e nodi; la seconda è che si dichiarino con chiarezza le variabili da ritarare localmente (clima, assetto gestionale, disponibilità di dati, politiche abitative e forme di vulnerabilità sociale); la terza è che l'uso del digitale non sia assunto come fine in sé,ma come supporto alla costruzione di scelte argomentate. Sono pertanto trasferibili in modo più diretto la logica di scomposizione, la costruzione dell'Atlante, il ricorso a una matrice decisionale esplicita e la traduzione degli esiti in abachi operativi, mentre richiedono adattamento locale i pesi attribuiti alle variabili, i prerequisiti tecnici e le priorità di intervento. Roma non è dunque caso eccezionale ma laboratorio utile a esplicitare una struttura metodologica applicabile altrove.

Benefici e compromessi | Il contributo si colloca direttamente all'intersezione tra gli SDG 9 e 10: rispetto al primo propone di leggere il digitale non semplicemente come strumento di modellazione, ma come infrastruttura cognitiva a supporto di decisioni più trasparenti, tracciabili e replicabili nel campo della rigenerazione del Patrimonio costruito; rispetto al secondo sostiene che la riduzione delle disuguaglianze nell'abitare non dipenda soltanto dalla quantità di alloggi disponibili, ma anche dalla capacità di migliorare in modo equo condizioni di comfort, accessibilità, sicurezza e qualità degli spazi condivisi senza espellere gli abitanti né imporre livelli di 'disruption' insostenibili (Bason et alii, 2020).

A questi due obiettivi principali si associano sinergie con altri SDG: con l'SDG 11 per il contributo alla resilienza e all'inclusività degli insediamenti esistenti; con l'SDG 7, nella misura in cui gli interventi sulle parti reversibili possono contribuire al miglioramento delle prestazioni energetiche e alla riduzio-



Fig. 3 | Tor Bella Monaca (Rome): orthophoto of the residential complex (credit: Google Maps, 2025).

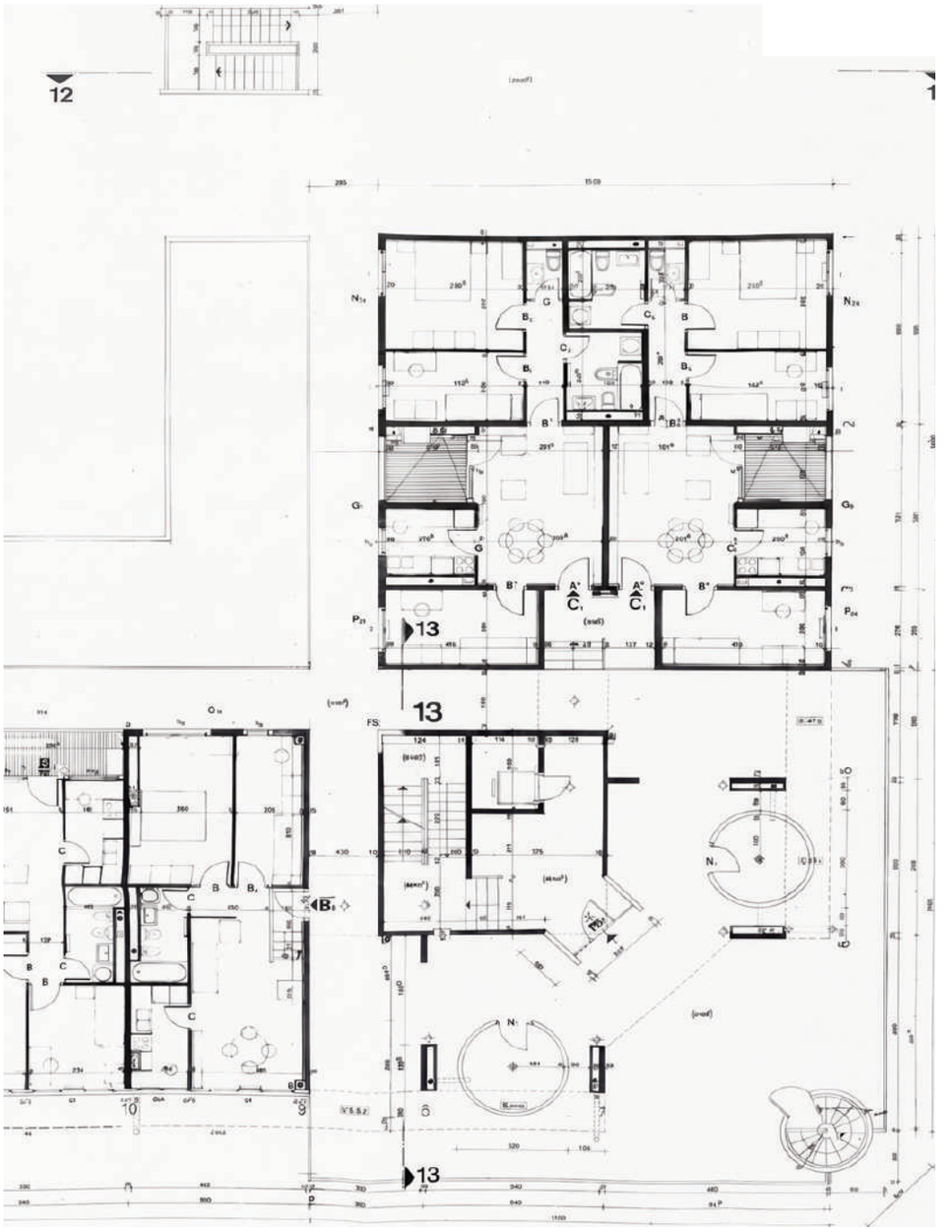


Fig. 4 | Tor Bella Monaca (Rome): selection of archive documents related to the complex and the main features of the settlement system (source: Fondo Pietro Barucci).

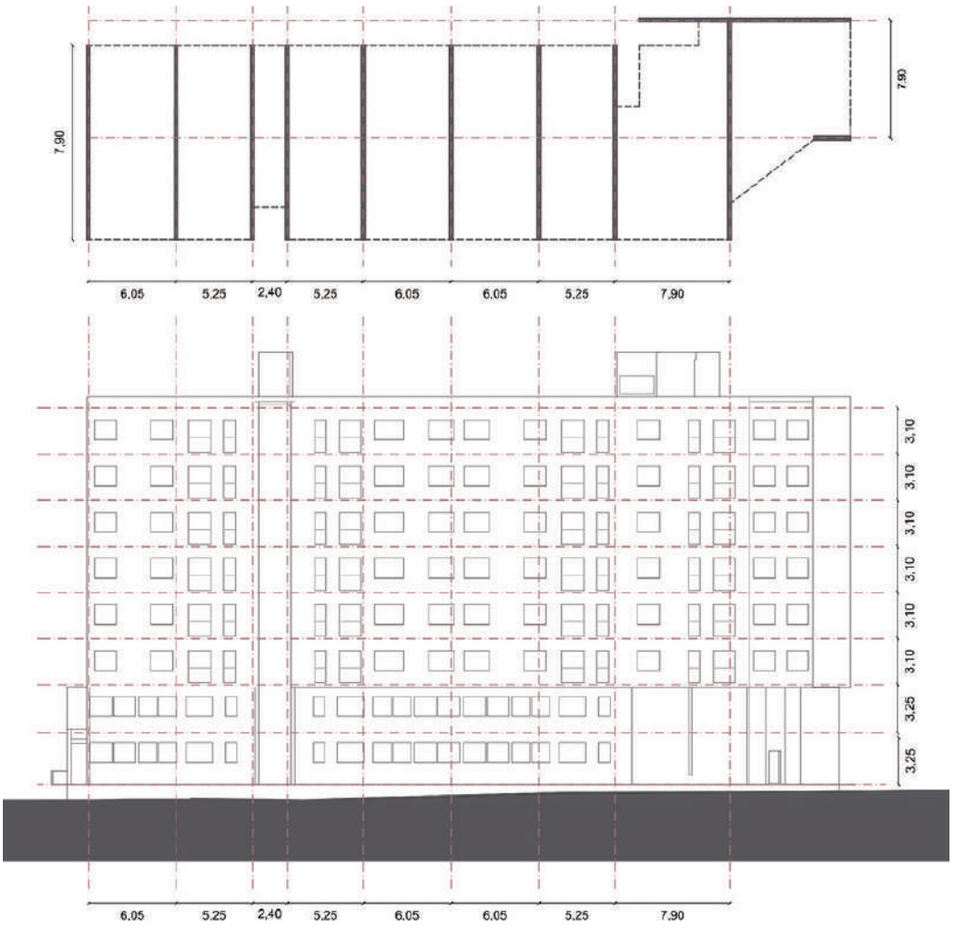


Fig. 5 | Extract from the Digital Atlas, Tor Bella Monaca (Rome): plan and elevation diagram of the building system (credit: C. Vannini, 2025).

ne della povertà energetica entro condizioni compatibili con risorse limitate e occupazione continua; con l'SDG 13 per il prolungamento della vita utile degli edifici e la riduzione dei consumi (Petzet and Heilmeyer, 2012); con l'SDG 3 per gli effetti del miglioramento della ventilazione, del comfort estivo e della qualità degli spazi condivisi sul benessere quotidiano.

Il protocollo rende però visibili anche i compromessi. Un primo compromesso riguarda la tensione tra la massimizzazione delle prestazioni e la minimizzazione della 'disruption': interventi molto spinti possono essere tecnicamente efficaci, ma difficilmente compatibili con un'occupazione continua, con tempi di cantiere contenuti e con risorse limitate. Un secondo compromesso emerge tra la trasformazione dell'immagine e la sostenibilità gestionale: soluzioni più incisive sul piano formale o spaziale possono migliorare la qualità percepita e l'abitabilità, ma non sempre risultano le più robuste o manutenibili nel lungo periodo.

E ancora il rapporto tra adattamento locale e replicabilità rivela che maggiore è la capacità di tarare finemente l'intervento al caso specifico, maggiore può essere la difficoltà di trasferire in blocco le soluzioni adottate; infine la relazione tra innovazione tecnica e capacità amministrativa deve cambiare poiché anche approcci progressivi e mirati richiedono una regia istituzionale in grado di coordinare dati, priorità, tempi, finanziamenti e strumenti di attuazione. La forza dell'approccio proposto risiede proprio nel non occultare tali tensioni e nel trasformarle in elementi espliciti del processo decisionale.

Conclusioni | Il contributo propone un cambio di paradigma: dall'applicazione di misure standard alla costruzione di un dispositivo capace di orientare decisioni incrementali, trasparenti e discutibili. Atlante, matrice e abaco collegano patologie ricorrenti e margini di trasformazione a opzioni tecnologiche compatibili con gestione pubblica, budget limitati e continuità d'uso. In questo quadro il digitale non è il fine dell'innovazione ma il mezzo che rende tracciabili i passaggi attraverso cui si costruiscono priorità, sequenze e compromessi.

Sul piano scientifico il principale avanzamento riguarda l'interpretazione delle 'parti reversibili' come campo privilegiato per una rigenerazione progressiva, reversibile e manutenibile. Tale interpretazione consente di spostare l'obiettivo dagli interventi eccezionali e totalizzanti a una logica di cura strutturata del Patrimonio, più coerente con la natura del costruito esistente e con le condizioni reali dell'ERP (Severino, 2021). Sul piano applicativo (Fig. 16) la metodologia proposta mostra come questo stock immobiliare si presti, in linea di principio, a trasformazioni anche molto differenti per intensità, scala e finalità (Magnago Lampugnani, 2016).

Proprio tale apertura non legittima però soluzioni indifferenziate, al contrario richiede valutazioni caso per caso, capaci di misurare il rapporto tra caratteri costruttivi, condizioni d'uso, margini effettivi di trasformazione e sostenibilità gestionale dell'intervento. Di conseguenza la trasferibilità del metodo non coincide con la replicazione delle soluzioni ma con la possibilità di riprodurre un processo argomentato di lettura, confronto e scelta (Sennett, 2018).

La ricerca riconosce anche i propri limiti: il primo riguarda la dipendenza dalla qualità e dalla continuità della base informativa; il secondo riguarda il carattere ancora programmatico della validazione ex post, che richiede ulteriori cicli di implementazione e di monitoraggio; il terzo riguarda la necessità di verificare il protocollo in contesti gestionali diversi da quello romano. A tali limiti si aggiunge la necessità di rafforzare la base quantitativa della comparazione tra scenari, attraverso dati su consumi, costi, tempi di cantiere e livelli di comfort. Proprio da questi limiti discendono gli sviluppi futuri più rilevanti: integrazione sistematica delle valutazioni post-occupazione, aggiornamento dinamico dell'Atlante attraverso registri manutentivi e dati d'uso, estensione del metodo a patrimoni comparabili in altri contesti climatici e amministrativi e maggiore interoperabilità con i sistemi informativi della Pubblica Amministrazione, affinché l'Atlante possa operare come supporto dinamico alla programmazione e alla gestione del patrimonio.

In definitiva il paper intende contribuire al dibattito internazionale sulla rigenerazione dell'edilizia residenziale pubblica del secondo Novecento mostrando che una transizione ecologica equa non può essere affidata solo a nuove tecnologie o a nuovi finanziamenti ma richiede anzitutto strumenti capaci di rendere espliciti, negoziabili e verificabili i criteri con cui si decide come trasformare l'esistente. Anche il ruolo degli abitanti non può restare sullo sfondo ma deve progressivamente entrare nella definizione delle priorità e nella valutazione della tollerabilità della disruption. È proprio in questa capacità di esplicitare priorità, vincoli e compromessi che

la metodologia proposta individua il proprio contributo specifico al dibattito scientifico e operativo sulla rigenerazione dell'abitare pubblico (Fig. 17).

The impact of climate change, the rising cost of energy, and the increasing social fragility of suburbs are imposing a profound revision of the models for intervening on the built heritage of the second half of the 20th century (Bologna, 2021). In this framework, the regeneration of Italian Public Residential Housing (lit. Edilizia Residenziale Pubblica – ERP) cannot be reduced to a straightforward question of energy efficiency, nor addressed through standardised retrofit packages (Ginelli and Castiglioni, 2012). The complexes built in Rome during the period between the 1970s and the 1980s (Maldonado, 1978), strongly characterised by an industrial approach to construction and the use of prefabricated systems (Figg. 1, 2), bring together technical criticalities, management issues, typological rigidity and social vulnerabilities that require more articulated knowledge devices (Di Giorgio, 2011). In line with Sustainable Development Goals (SDGs) no. 9 and no. 10, the contribution assumes these neighbourhoods as social infrastructures: when they degrade or are no longer adequate for contemporary uses, inequalities are amplified through differential exposures to thermal discomfort, energy poverty, accessibility barriers and loss of quality of use of intermediate and collective spaces (Cangelli, 2025).

The contribution is based on doctoral research dedicated to the sustainable renewal of Roman public housing and adopts the industrialised heritage of the City of Rome's first Economic and Popular Housing Plan as its laboratory. The starting point is a recurring misalignment: interventions on prefabricated ERP heritage are often defined through sectorial technical measures that neglect the original construction logics, the stratified transformations produced by decades of maintenance and adaptation in use, and the socio-technical constraints typical of public management. As a result, design choices are often opaque, difficult to compare and only weakly transferable (Paris and Bianchi, 2018).

Hence, the working hypothesis: effective and equitable renewal cannot be understood as a mere sum of technologies, but requires a knowledge infrastructure capable of making systems, vulnerabilities, transformation margins, priorities and trade-offs explicit (Picon, 2010). The contribution pursues three objectives: to define a knowledge and decision-making protocol for the incremental regeneration of industrialised public housing; to show its translation into a Digital Atlas, decision-making matrix, and operational abacus; to test its relevance on a set of cases of the first Economic and Popular Housing Plan of Rome, taken as a test field for a transferable methodology. In this sense, the 'soft parts'[1] of the building, i.e. non-structural, upgradable and shorter-life components that allow for the production of significant benefits with site impacts compatible with limited budgets and continuous occupation (Habraken, 1999), constitute a privileged field of intervention.

The contribution is divided into six steps: state of the art; methodology and operational phases; Roman case study; results; governance, barriers and transferability; reflection on synergies and trade-offs with respect to SDGs 9 and 10 of Agenda 2030. The contribution's interest lies in the possibility of setting out a protocol that can be replicated



Fig. 6 | Excerpt from the Digital Atlas, Tor Bella Monaca (Rome): plan type and functional schemes (credit: C. Vannini, 2025).



Fig. 7 | Torrevecchia (Rome): the tower used for experimentation, seen from the elevated walkway system that connected the residential body to the slab intended for commercial activities (credit: C. Vannini, 2025).

beyond the Roman case and is useful for comparable ERP assets.

State of the art and reference cases | The regeneration of the housing heritage of the second half of the twentieth century is currently shaped by a twofold tension (Migotto and Tattara, 2023): on the one hand, environmental urgency requires a reduction in energy consumption, emissions, and resource use; on the other, ecological transition must not produce new forms of exclusion through expensive, invasive interventions or interventions incompatible with residents remaining in place (Battaino, Fossati and Marconi, 2025).

In many European contexts, the public and collective residential housing stock of the second half of the 20th century, especially those built with industrialised techniques and prefabricated components, presents well-known technological recurrences and vulnerabilities: prefabricated panels, critical nodes and joints, thermal bridges, obsolete windows and doors, ventilation deficiencies and poor maintenance accessibility (Block and Ruggiero, 2023). However, the use of 'catalogue' retrofit solutions reveals their limitations when they fail to consider the situated nature of the problems, the buildings' maintenance history, and the constraints of public management (Boughton, 2023).

Within the European debate, intervention strategies tend to oscillate between conservative and transformative approaches (Jessen and Schneider, 2006): the former aim at preserving the architectural identity of the building, improving its performance and comfort, while the latter rewrite the envelopes, thresholds, intermediate spaces and relations with the ground in a more pronounced way. In both cases, the most relevant projects show that ERP redevelopment is not reducible to an energy issue but involves the relationship between interior and exterior, between individual and collective space, and between building and neighbourhood (Plevoets and Van Cleempoel, 2019). The theme of living is thus intertwined with those of permanence, affordability, site management and everyday use (Graf and Marino, 2016).

In this perspective, some recent European cases selected on the basis of four criteria are particularly interesting: belonging to contexts comparable to the Italian one; reference to buildings of the second half of the 20th century; presence of industrialised or prefabricated technologies; relevance with respect to the relationship between conservation, transformation and habitability (Ciorra and Marini, 2011). Comparability is not based on the mere formal similarity between buildings, but on the recurrence of certain conditions: construction seriality, performance vulnerability, the presence of repetitive components, the need to contain costs, levels of site interference, and the permanence of inhabitants during at least part of the transformation process. The selection is not intended to build an exhaustive repertoire, but to identify experiences capable of showing how the transformation of modern residential heritage is measured against the problems of continuity of use, the quality of intermediate space, and the relationship between performance improvement and the redefinition of living (Guidetti, 2025).

De Flat Kleiburg in Amsterdam (Netherlands), designed by NL Architects, is an example of a conservative intervention that avoids demolition by enhancing the existing structure and introducing a model of transformation with a low economic threshold. Park Hill in Sheffield (United Kingdom), on the other hand, shows the ambivalence of redevelopment processes capable of restoring architectural quality to a large modernist complex, yet also of producing selective effects at the social level. The Madonna Bianca Towers in Trento (Italy) represent a relevant case of performance and maintenance upgrading of an Italian prefabricated heritage. Finally, the cases of Génicart in Lormont (France) and Ellebo Garden Room in Ballerup (Denmark) highlight how transformative interventions can act on loggias, façades, intermediate spaces, and the ground to improve comfort and the relational quality of everyday living (Druot, Lacaton and Vassal, 2007).

Three aspects emerge from the comparison with these experiences: the first is that the quality of the intervention does not depend only on the technical depth of the retrofit, but also on the ability to construct scenarios consistent with the building's constructive character and with the actual conditions of use; the second is that the social effectiveness of regeneration is not automatic, since even a good project can produce exclusivity as an outcome if it does not correctly govern affordability, time, inconvenience, and permanence of the inhabitants (Secchi, 2013). The third is that there is a lack, in many cases, of a robust knowledge infrastructure at the scale of the building component, capable of translating analyses, criticalities and objectives into traceable and comparable decisions; this gap informs a number of variables used in the construction of the decision matrix, including site invasiveness, compatibility with continuity of use, impact on environmental performance, effects on spatial and relational quality, maintainability, economic sustainability, managerial robustness and replicability of solutions (Paganin et alii, 2024). It is in this passage that this contribution presents its methodological proposal, whose originality lies in the intertwining of the object, method, tool, and operational outcome.

Methodology and operational steps | The research poses a twofold question: what characteristics of the industrialised ERP heritage condition its transformability, and what strategies can improve its performance and habitability while remaining compatible with the urban, social, and management context? To answer this, the research defines a three-stage methodology that is repeatable across comparable contexts. The approach adopts a research-by-design^2 approach, in which the construction of knowledge, the critical interpretation of the built environment, and the definition of design scenarios proceed in an integrated manner, without rigidly separating analysis and design (Ortega, 2017).

The first phase consists of building the knowledge base. It includes the digitisation and critical re-reading of design archives, technical reports, executive drawings, photographic documentation, and materials produced by the managing bodies; the reconstruction of the original construction logics; the mapping of alterations that have occurred over time; the recognition of maintenance cycles, recurring failures and usage practices (Graf, 2014). At this stage, it is not just a matter of 'collecting da-

ta', but of constructing a stable nomenclature of systems, subsystems, components, and nodes, capable of forming the common basis for subsequent phases. The objective is therefore not the simple documentary restitution of the existing heritage, but the construction of an interrogable information structure, useful for relating the constructional characteristics, recurring vulnerabilities, and margins of transformation. In the Roman case, this base was constructed from an integrated set of documentary sources, direct surveys, photographic documentation, and materials relating to recent or planned interventions.

The second phase translates the collected evidence into digital reconstructions and parametric component libraries. The geometric and material survey, integrated with targeted diagnostic checks, enables verification of consistency, discontinuities, maintenance accessibility, and the main performance-related criticalities. Particular attention is paid to the elements most exposed to obsolescence, including vertical closures, windows and doors, loggias, screens, threshold spaces, accessible plant parts, distribution systems, and common spaces. At the same time, targeted checks are carried out on thermo-hygrometric comfort, ventilation, natural lighting, accessibility and quality of use, so that the digital model does not remain a mere representative support.

At this stage, the digital model does not correspond to a single survey or representation operation, but rather serves as an interpretative and comparative device through which the collected data are selected, organised, and related to possible intervention families (Picon, 2022). It is in this passage that the research-by-design approach becomes operational: the project does not appear only as a final outcome, but also as an intermediate verification tool, useful for testing the relevance of the information collected and for orienting its reading from a transformative perspective (Osello et alii, 2024).

The third phase concerns the assembly and comparison of incremental scenarios. Starting from the building component-based framework defined in the first two phases, intervention packages are developed and tested on a set of selected cases. These scenarios are compared using a decision matrix (Tab. 1) that relates benefits and constraints: energy and comfort improvements, reduction of barriers to use, technical feasibility, compatibility with continued use, maintainability, site impacts, and procurement requirements. The outcome is not a single, definitive project, but a system of argued and comparable options. The comparison between scenarios, therefore, does not aim to identify an optimal solution in the abstract but rather to make explicit the criteria by which the different options are evaluated, highlighting their convergences, tensions, and trade-offs.

The method's replicability lies in the clarity of its operational units and the criteria used to compare the scenarios: database, taxonomy, digital reconstruction, criticality check, matrix comparison, and abacus translation. Inputs include design and maintenance archive sources, geometric and material surveys, photographic documentation, in situ findings on recurring nodes and components, and data on conditions of use, accessibility, comfort, and management. This information is traced back to a classificatory structure divided into systems, subsystems, components, and nodes, which serves as a common basis for the comparative reading of the cases and for populating the Digital Atlas.

The reliability of the evidence is instead guaranteed by triangulation across archive sources, in situ surveys, and consistency checks of recurring components and nodes. As for validation, the methodology distinguishes between ex ante validation – based on performance checks, consistency between sources, classification, and scenario construction – and ex post validation, which is still to be systematically implemented and based on monitoring of actual consumption, post-occupancy evaluations, maintenance logs, usage reports, and

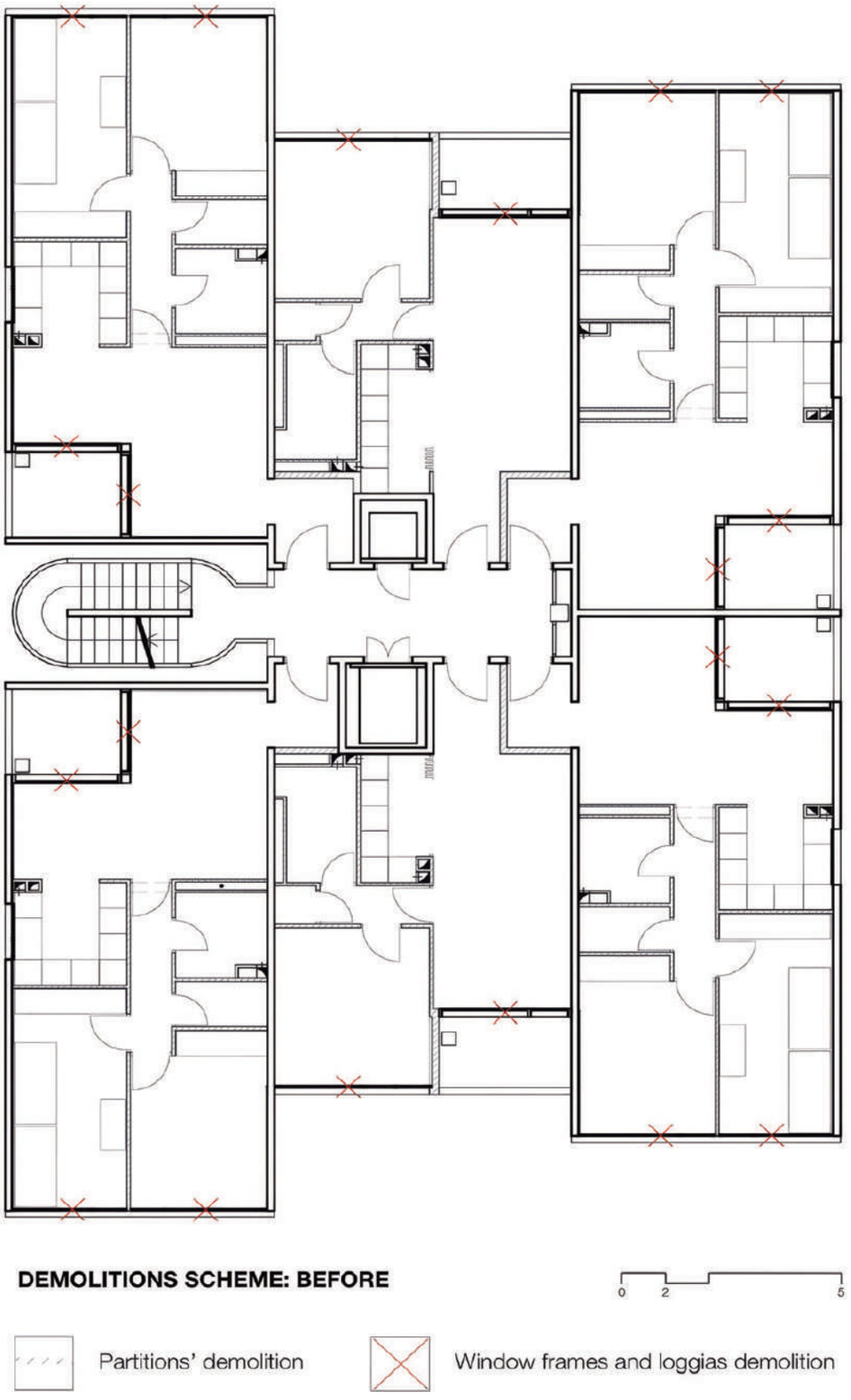


Fig. 8 | Torrevecchia (Rome): existing condition; typical floor plan of the building selected for the experimental application, with structural interventions highlighted (credit: C. Vannini, 2025).

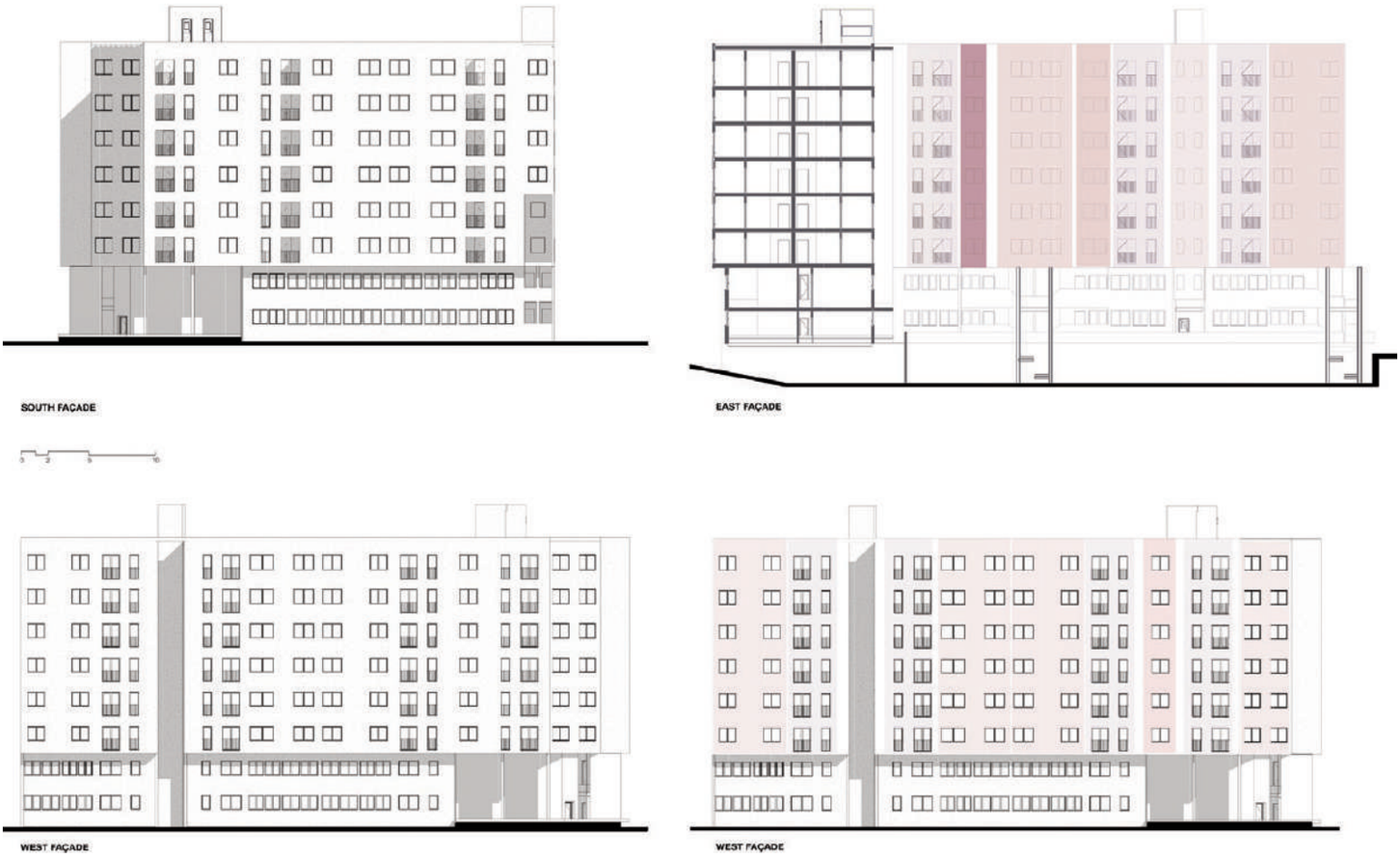


Fig. 9 | Extract from the Digital Atlas, Tor Bella Monaca (Rome): elevations of the residential complex and articulation of the façade system (credit: C. Vannini, 2025).

comfort questionnaires. Thus, the methodology defines a potentially repeatable process in which data production, scenario formulation, and result verification can be progressively updated.

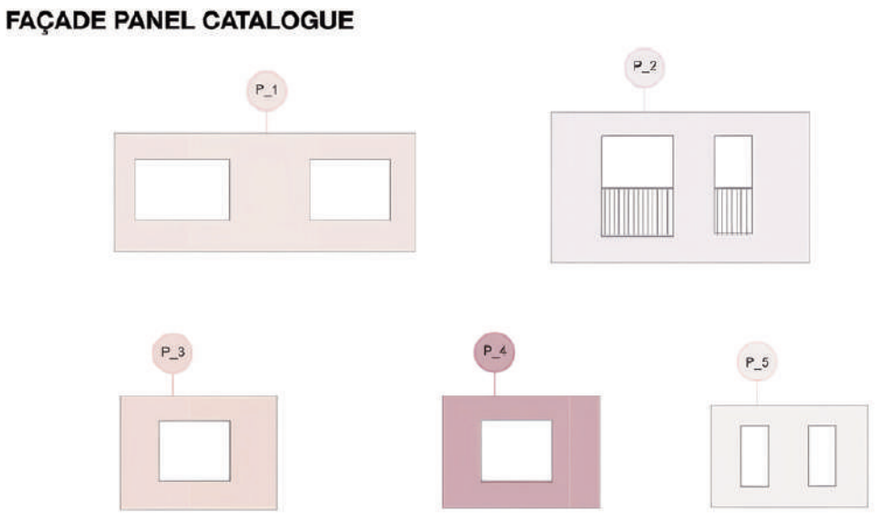
The case study: the first PEEP in Rome as a laboratory | The first Economic and Popular Housing Plan in Rome[3] constitutes a particularly significant laboratory to test the described protocol. Its relevance depends not only on the scale, but also on the combination of four conditions: 1) diffusion of industrialised and prefabricated systems; 2) recurrence of maintenance and performance problems; 3) presence of typological variations sufficient to test the internal transferability of the method; 4) persistence of typical constraints of ERP management, such as continuous occupancy, limited resources, and fragmentation of maintenance cycles. The first Roman PEEP enables the observation, within the same institutional and administrative context, of a plurality of building and settlement configurations (Fig. 3) thereby allowing comparison across cases without compromising the coherence of the field of analysis (Dell'Acqua and Sansò, 2022). The focus is particularly on the heritage built in the 1970s, a period in which serial construction and prefabrication became essential tools for rapidly producing large quantities of housing. If these choices allowed an unprecedented acceleration in construction times, they also generated distributional rigidity, critical façade nodes, poor adaptability over time, and performance vulnerabilities evident today (Figg. 4, 5). The co-presence of repetitive logic and local variants makes the Roman case particularly suitable for verifying an approach based on the decomposition into systems, subsystems, components, and nodes, avoiding both abstract generalisations and exclusively monographic readings (Fig. 6).

The selection of case studies follows stated criteria: availability of sources and surveys; typological significance; presence of prefabricated or industrialised systems; interest with respect to ongoing or planned transformations. These criteria are flanked by the desire to include cases capable of restoring different conditions of preservation, accessibility of information, and levels of transformation that have already occurred, so as to test the methodology's resistance in situations that are not perfectly homogeneous. In this perspective, the corpus analysed includes neighbourhoods such as Tor Bella Monaca, Vigne Nuove, Tiburtino Sud and Pineto, flanked by an experiment on a tower building in the Torrevecchia neighbourhood (Fig. 7), used as an application case to test incremental packages in the presence of constructive recurrences and use-related criticalities. These neighbourhoods are not considered isolated episodes, but rather complementary fields of observation, useful for verifying how the methodology responds to changes in typological configurations, constructional features, and maintenance conditions.

The case of Tor Bella Monaca is of particular interest because it allows us to observe how choices change across transitions between different project levels and between different funding programmes, making the compromises that emerge when site, procurement, and management constraints come into play more legible (Cellamare, 2016). The case of Torrevecchia is used instead in a more explicitly experimental manner (Fig. 8), as a test bed to verify the construction of incremental scenarios on a building body characterised by a high recurrence of nodes and a legible relationship between components, performance criticalities, and possible families of intervention.

The use of the first PEEP as a laboratory does not imply that the Roman context is taken as an absolute paradigm; on the contrary, the case is treated here as a field of verification of a method based on the distinction between generalisable and contextual aspects. Generalisable aspects include, for example, the logic of decomposition into systems, subsystems, components, and nodes, the focus on soft parts, the construction of comparable scenarios and the explication of decision-making criteria. On the other hand, the availability of data, the governance set-up, the maintenance framework of the managing bodies, the form of climate vulnerabilities, and the local cost system remain highly contextual. In these terms, Rome is treated as the verification environment.

Results: Digital Atlas, decision matrix and operational abacus | The main outcome of the research is a Digital Atlas conceived not as a descriptive repertoire, but as a knowledge and decision infrastructure (Figg. 9-11). This device is configured as a taxonomy of case studies and their



FAÇADE PANEL CATALOGUE

CODE	QUANTITY	DIMENSIONS (BxH) [m]	FLOOR
P_1	60	5,25 x 3,00	from F2 to F7
P_2	66	5,25 x 3,00	from F2 to F7
P_3	6	2,20 x 3,00	F2 & F3
P-4	16	2,20 x 3,00	from F4 to F7
P_5	6	2,50 x 3,00	from F2 to F7

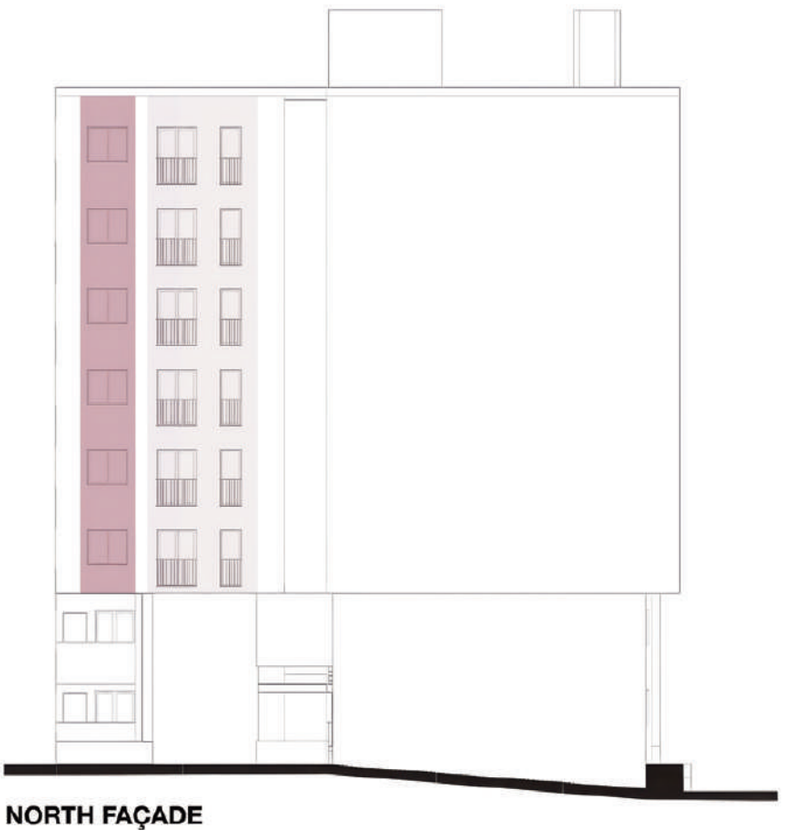


Fig. 10 | Extract from the Digital Atlas, Tor Bella Monaca (Rome): abacus of the prefabricated façade panels (credit: C. Vannini, 2025).

recurring components, articulated in successive information levels and aimed at making criticalities, transformation margins and intervention scenarios comparable. A first level gives the context: neighbourhood, typology, chronology, conditions of use, constraints and opportunities. A second level covers the main systems of the envelope, distribution, common spaces, facilities and urban-building interfaces. A third and fourth level focus on subsystems, components, and nodes, codifying stratigraphies, recurring criticalities, accessibility, requirements and margins for transformation. A final level relates these elements to intervention options, prerequisites, dependencies, sequences and degrees of 'disruption'[4]. This makes it possible to consult not only individual buildings, but also families of components, pathologies, project objectives and usage scenarios. Its operational character lies in the possibility of moving, within the same information structure, from the description of the built environment to the selection of intervention hypotheses (Block, Perriccioli and Rossi-Schwarzenbeck, 2019).

A second result concerns the focus on soft parts as a privileged field of incremental regeneration (Fig. 12). In this contribution, they include windows, and screens, light envelope layers, bioclimatic loggias and winter gardens, threshold components, intermediate spaces, distribution elements, and accessible service components. Working on the soft parts makes it possible to improve performance and quality of use without compromising the load-bearing structure, aligning interventions with ordinary maintenance cycles, reducing the level of invasiveness of the construction site and making progressive and reversible actions possible, with tangible benefits in terms of comfort, accessibility and liveability of shared spaces. The most relevant result is to have verified their role as the main transformation margin, compatible with the typical operating conditions of ERP: continuous occupation, limited resources, progressive



Fig. 11 | Excerpt from the Digital Atlas, Tor Bella Monaca (Rome): abacus of window frames and main recurring variants (credit: C. Vannini, 2025).

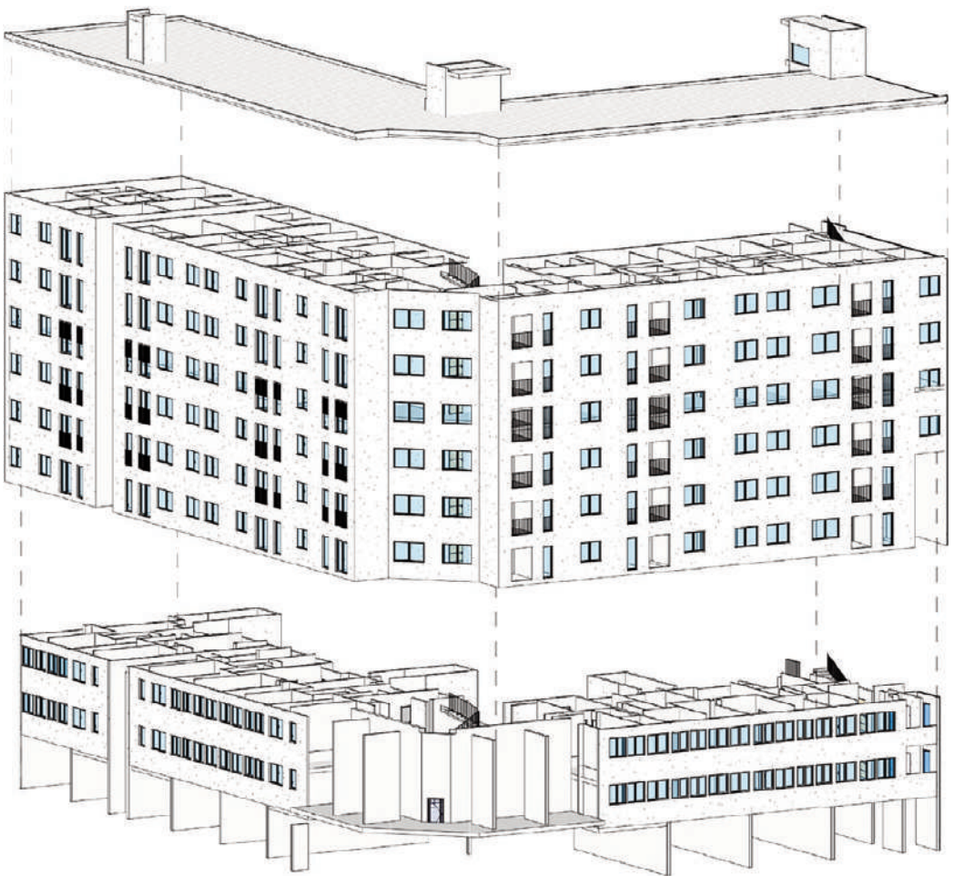
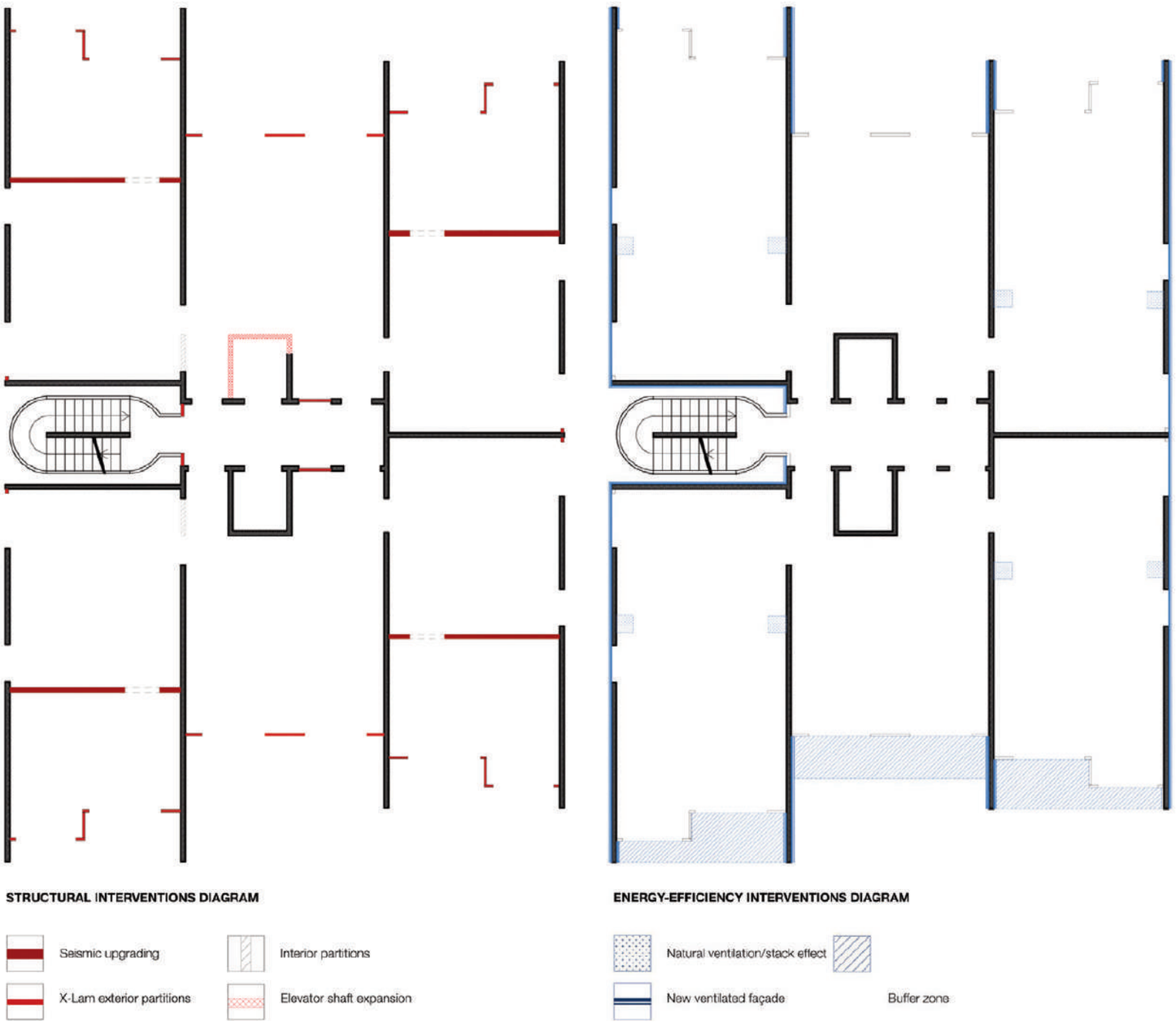


Fig. 12 | Extract from the Digital Atlas, Tor Bella Monaca (Rome): axonometry of the building system and the main technological components (credit: C. Vannini, 2025).



Figg. 13, 14 | Torrevecchia (Rome): schematic diagram of the seismic improvement works, extension of the lift shaft and new dry walling; scheme of free cooling interventions, ventilated façade and solar shading devices (credit: C. Vannini, 2025).

maintenance, and containment of 'disruption'.

The third result is the definition of a decision matrix that prevents the Atlas from remaining a simple descriptive tool. Each scenario is compared against explicit criteria: technical benefits, quality of use, accessibility and safety, feasibility, site impacts, maintainability, and compatibility with continued use. The value of the matrix lies not in automating decisions but in making trade-offs transparent. For example, it becomes clear how maximising the energy benefit may come into tension with minimising site disruption, or how transforming the building's image may improve certain aspects of use but generate problems of cost, maintenance, or management acceptability. The matrix does not replace political or technical choice; rather, it makes that choice debatable, arguable, and comparable.

A fourth result is the operational abacus, which translates Atlas and matrix into intervention packages organised in phases (Figg. 13, 14; Tab. 2). One can thus distinguish minimal packages, oriented towards comfort and energy poverty reduction with low 'disruption', based e.g. on window frames, shading and micro-interventions on thresholds; intermediate packages, integrating bioclimatic devices and interventions on common spaces; more advanced packages, redefining interfaces, intermediate spaces and relations with the ground in a more profound way. The abacus is also useful for procurement, as it clarifies prerequisites, sequences, minimum performance requirements, replicable elements and case-specific elements. It represents the most operational and applicable translation of the entire research pathway (Fig. 15) with respect to design criteria, intervention intensity, and feasibility conditions, providing a useful basis for the design, planning, and management of interventions.

Overall, the results show that the regeneration of this housing stock, largely built according to prefabricated and industrialised logics, does not necessarily require comprehensive interventions to be effective (Lepratto, 2024). The ability to construct a cognitive framework linking recurring vulnerabilities and margins of transformation to technical options compatible with resources, timing, and actual management conditions appears decisive. The effectiveness of the intervention depends less on its abstract radicality than on the ability to calibrate progressive, comparable, and argued scenarios in which expected benefits, operational limits, and trade-offs are made explicit (Reichlin and Pedretti, 2011).

Intervention intensity	Main components involved	Main objectives	Prerequisites	Implementation sequence	Compatibility with continued occupancy	Replicability level	Main critical issues	Main trade-offs
Minimum package	Windows and external doors, solar-shading devices, threshold elements, minor accessible building-services components	Reduce overheating, thermal discomfort and energy poverty; improve basic comfort and usability with limited construction disruption	Basic survey available; recurring junctions identified; limited budget; no temporary decanting required	Survey → component mapping → replacement / adjustment of selected soft parts → basic performance checks	High	High	Fragmented maintenance records; limited impact on shared spaces; risk of only partial effectiveness	Lower disruption and cost, but more limited spatial and environmental effects
Intermediate package	Windows and external doors, solar shading, loggias / bioclimatic buffer spaces, selected shared spaces, accessible circulation elements	Improve comfort, environmental performance and everyday use; strengthen intermediate spaces and collective usability	Integrated survey and digital model; coordination with residents; phased site planning	Survey → Digital Atlas population → scenario comparison → phased intervention on the envelope and shared areas → post-intervention verification	Medium-High	Medium-High	Higher coordination needs; greater construction interference; dependence on phased management	Better performance and quality of use, but higher cost, longer programme and greater management complexity
Advanced package	Dry envelope systems, façade interfaces, intermediate spaces, circulation systems, shared spaces and selected accessible technical upgrades	Reconfigure building-dwelling interfaces; improve environmental quality, accessibility and spatial relationships at a broader scale	Robust knowledge base; secured funding; strong technical and administrative coordination; staged implementation strategy	Integrated knowledge framework → matrix-based scenario selection → multi-stage implementation → monitoring and adjustment	Medium-low	Medium	Demanding procurement and governance requirements; possible incompatibility with continued occupancy; increased construction disruption	Greater transformative impact, but higher disruption, cost, longer programme and dependency on management capacity

Tab. 2 | Operational package table for incremental intervention intensity levels on soft parts. Interpretive note: packages are not fixed solutions but operational clusters of actions to be calibrated according to building type, use conditions, available data, budget and acceptable level of disruption (credit: the Authors, 2026).

Governance, barriers and transferability | One of the most delicate points in the contemporary debate on ERP regeneration concerns the relationship between the technical quality of the intervention and that of the decision-making process that generates it. In the case under consideration, the Atlas and the matrix do not make sense unless they serve as devices that connect technical knowledge, public management, and user needs. For this reason, the protocol attributes a decisive role to the subjects involved (researchers, planners, managing bodies, technical structures, administrations, and inhabitants), whose involvement is not conceived as generic participation, but rather as the progressive co-definition of the criteria and weights with which the scenarios are evaluated. In particular, the possibility of integrating variables related to discomfort, accessibility, use of intermediate spaces, or site tolerability into the process gives concrete content to the notion of equity.

The application of the protocol, however, also reveals certain research limitations. These relate mainly to the sample, the uneven availability of data, the survey's scale, the validation's still predominantly ex ante nature, and a number of barriers that hinder the dissemination of incremental knowledge-based approaches.

First of all, there are cultural barriers, linked to the persistence of a vision of retrofit as a standardised technical-normative response; then there are economic and administrative barriers, which tend to privilege measures that can be easily accounted for or aligned with sectoral financing instruments, penalising more integrated interventions that are also more difficult to classify within conventional categories.

To these are added technical barriers due to the fragmentation of information, the absence of systematic surveys, the discontinuity of maintenance records, and the difficulty of linking historical archives, the existing condition, and contemporary design. Finally, there are regulatory and procedural barriers that often do not reward the construction of progressive and maintainable packages, nor the possibility of updating the knowledge base over time, compounded by social and managerial difficulties in involving inhabitants in setting priorities and acceptable levels of 'disruption' (Nelson and Schneider, 2019).

Regarding transferability, the contribution argues that the protocol can be extended to other comparable European contexts under three conditions: the first is that one works on assets with constructive recurrences that are sufficiently legible to be recoded by systems, subsystems, components, and nodes; the second is that one clearly states the variables to be recalibrated locally (climate, management structure, data availability, housing policies, and forms of social vulnerability); the third is that the use of the digital is not assumed as an end in itself, but as support for the construction of reasoned choices. Therefore, the logic of decomposition, the construction of the Atlas, the use of an explicit decision matrix, and the translation of outcomes into operational abacuses are more directly transferable, whereas the weights attributed to variables, technical prerequisites, and intervention priorities require local adaptation. Rome is thus not presented as an exceptional case but as a useful laboratory for making explicit a methodological framework applicable elsewhere.

Benefits and trade-offs | The contribution lies directly at the intersection between SDGs 9 and 10: with respect to the former, it proposes to read digital not simply as a modelling tool, but as a cognitive infrastructure supporting more transparent, traceable and replicable decisions in the field of regeneration of the built heritage; with respect to the latter, it argues that the reduction of inequalities in housing does not depend only on the quantity of available housing, but also on the ability to equitably improve conditions of comfort, accessibility, safety, and quality of shared spaces without expelling inhabitants or imposing unsustainable levels of 'disruption' (Bason et alii, 2020).

These two main goals are associated with synergies with other SDGs: with SDG 11 for the contribution to the resilience and inclusiveness of existing settlements; with SDG 7, insofar as interventions on soft parts can contribute to the improvement of energy performance and the reduction of energy poverty within conditions compatible with limited resources and continuous occupancy; with SDG 13 for the extension of building lifetimes and the reduction of consumption (Petzet and Heilmeyer, 2012); with SDG 3 for the effects of improved ventilation, summer comfort and the quality of shared spaces on daily well-being.

However, the protocol also makes the trade-offs visible. A first compromise concerns the tension between maximising performance and minimising 'disruption': highly intensive interventions may be technically effective, but are rarely compatible with continuous occupancy, short construction times, and limited resources. A second compromise emerges between image transformation and managerial sustainability: more formally or spatially incisive solutions may improve perceived quality and habitability, but are not always the most robust or maintainable in the long term.

A third compromise concerns the relationship between local adaptation and replicability: the more precisely the intervention is fine-tuned to the spe-

cific case, the more difficult it becomes to transfer the adopted solutions as a whole. Finally, a fourth trade-off concerns the relationship between technical innovation and administrative capacity, since even progressive and targeted approaches require institutional direction to coordinate data, priorities, timeframes, funding, and implementation tools. The strength of the proposed approach lies precisely in not concealing these tensions and in transforming them into explicit elements of the decision-making process.

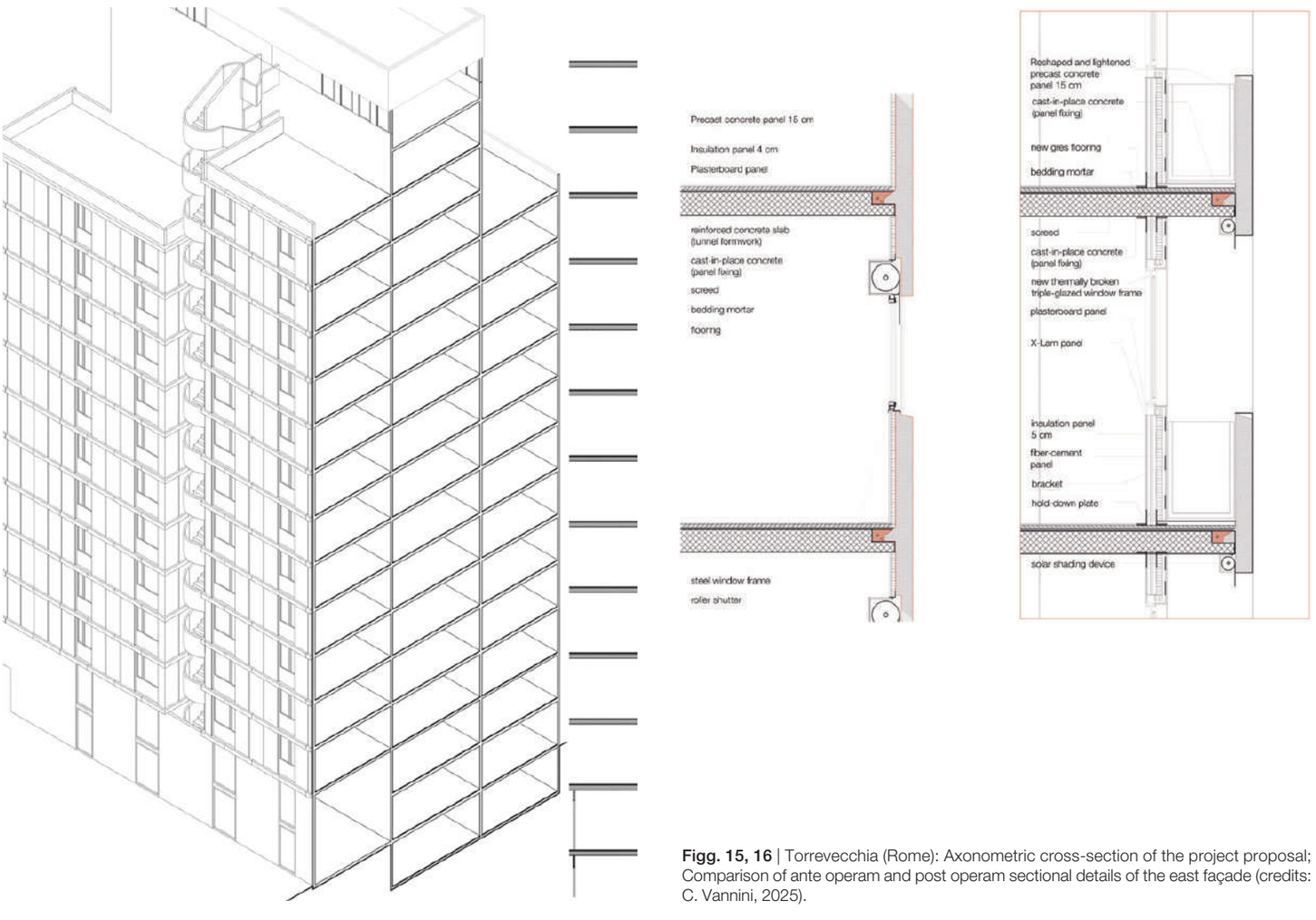
Conclusions | The contribution proposes a paradigm shift: from the application of standard measures to the construction of a device capable of guiding incremental, transparent decisions open to scrutiny. The Atlas, matrix, and abacus link recurrent pathologies and margins for transformation to technological options compatible with public management, limited budgets, and continuity of use. In this framework, the digital is not the endpoint of innovation, but the means of making traceable the steps through which priorities, sequences, and trade-offs are constructed.

On a scientific level, the main advance concerns the interpretation of 'soft parts' as a privileged field for progressive, reversible and maintainable regeneration. This interpretation makes it possible to shift the objective from exceptional, totalising interventions to a logic of structured care for the stock, more consistent with the nature of the existing built environment and the real conditions of the ERP (Severino, 2021). At the application level (Fig. 16), the proposed methodology shows how this housing stock lends itself, in principle, to transformations that differ in intensity, scale, and purpose (Magnago Lampugnani, 2016).

It is precisely this openness, however, that does not legitimise undifferentiated solutions; on the contrary, it requires case-by-case evaluations, capable of measuring the relationship between building characteristics, conditions of use, effective margins of transformation, and the management sustainability of the intervention. Consequently, the transferability of the method does not coincide with the replication of solutions, but with the possibility of reproducing an argued process of reading, comparison, and choice (Sennett, 2018).

The research also acknowledges its limitations: the first concerns the dependence on the quality and continuity of the information base; the second concerns the still programmatic nature of the ex-post validation, which requires further implementation and monitoring cycles; the third concerns the need to test the protocol in management contexts other than the Roman one. These limitations are compounded by the need to strengthen the quantitative basis for comparing scenarios through data on consumption, costs, construction times, and comfort levels. It is precisely from these limitations that the most relevant future developments derive: systematic integration of post-occupancy evaluations, dynamic updating of the Atlas through maintenance records, and usage data, extension of the method to comparable assets in other climatic and administrative contexts, and greater interoperability with the information systems of the Public Administration, so that the Atlas may operate as a dynamic support for planning and management of the heritage.

Ultimately, the paper intends to contribute to the international debate on the regeneration of public housing in the second half of the twentieth century by showing that a fair ecological transition cannot be entrusted only to new technologies, or new financing, but first and foremost requires tools capable of making explicit, negotiable, and verifiable the criteria with which decisions are made on how to transform the existing building stock. The role of the inhabitants cannot remain in the background either, but must progressively enter into the definition of priorities and the assessment of the tolerability of disruption. It is precisely in this ability to make priorities, constraints, and compromises explicit that the proposed methodology identifies its specific contribution to the scientific and operational debate on the regeneration of public housing (Fig. 17).



Figg. 15, 16 | Torrevecchia (Rome): Axonometric cross-section of the project proposal; Comparison of ante operam and post operam sectional details of the east façade (credits: C. Vannini, 2025).



Fig. 17 | Tor Bella Monaca (Rome): photos from the PUI construction site, 24 May 2025 (credit: C. Vannini, 2025).

Acknowledgements

The present article derives from the doctoral research of C. Vannini, carried out under the supervision of Professor S. Paris (Rapporteur), and Professor A. Bologna (Co-Rapporteur), entitled 'Digital models for the technological design for the sustainable renewal of public housing – The case study of the I Plan for Economic and Popular Housing in Rome', developed within the framework of the DRACo – PhD in Architecture and Construction, 'Sapienza' University of Rome (Italy). The PhD scholarship was co-funded by the National Operational Programme Research and Innovation 2014-2020, FSE REACT-EU resources, Actions IV 'PhDs and research contracts on innovation topics', and IV.5 'PhDs on Green topics'. The research was also developed in partnership with BEST Design S.r.l.

This contribution is the result of a common reflection of the authors. Nevertheless, the introductory paragraph and the 'Conclusions' are attributed to S. Paris and C. Vannini, while the remaining paragraphs are to be attributed to C. Vannini.

Notes

1) In this contribution, the expression 'soft parts' is used in operational terms to indicate a field of intervention rather than a closed and univocal category of building elements. It includes, depending on the case, non-structural components and devices on which it is possible to act more gradually than on load-bearing parts. The delimitation of this scope is therefore not absolute, but depends on the relationship between the building's constructional features, the accessibility of the components, and the effective margins for transformation.

2) The use of the research-by-design formula is to be understood here in a methodological and not merely descriptive sense. The project is not intended as the final translation of already defined knowledge, but as an intermediate verification tool, capable of guiding the selection of data, testing the intervention hypotheses, and making legible the relations between the criticalities detected, the margins of transformation, and the possible scenarios. In this perspective, analysis and project do not constitute rigidly separate phases, but mutually implicated moments in the construction of knowledge.

3) The reference to the first Economic and Popular Housing Plan in Rome should be read in the context of the broader season of implementation of Italian Law no. 167 of 18 April 1962, which introduced specific instruments for the acquisition of areas destined for economic and popular housing and contributed decisively to the construction of the great public residential expansions of the second half of the 20th century. In the Roman case, this framework favoured the construction of a vast set of neighbourhoods marked by strong seriality of construction, the use of industrialised systems, rapid executive speed, and the significant public dimension in the production of living space. Precisely these characteristics, which originally constituted their operative strength, are also at the origin of some criticalities that have emerged over time: typological rigidity, maintenance difficulties, vulnerability of technological nodes, and misalignment between the original layouts and contemporary uses.

4) In the text, the term 'disruption' is used to indicate the degree of interference that an intervention produces on the building's continuity of use and on the permanence of its inhabitants. The notion encompasses, in a broad sense, the duration and complexity of the construction site, the possible need for temporary relocation, the impact on daily practices, the level of residual accessibility during the works, and, more generally, the management sustainability of the intervention within the framework of public housing.

References

Bason, C., Conway, R., Hill, D. and Mazzucato, M. (2020), *A New Bauhaus for a Green Deal*. [Online] Available at: ucl.ac.uk/bartlett/public-purpose/publications/2021/jan/new-bauhaus-green-deal [Accessed 8 April 2026].

Battaino, C., Fossati, P. and Marconi, F. (2025), "Ripensare l'abitare – Progetto e architettura per un abitare flessibile e accessibile | Rethinking housing – Design and architecture for flexible and affordable living", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 17, pp. 156-167. [Online] Available at: doi.org/10.69143/2464-9309/17102025 [Accessed 8 April 2026].

Block, M. and Ruggiero, R. (2023), "Housing in Transit – Quale transizione per l'edilizia residenziale pubblica industrializzata? | Housing in Transit – Which transition for the industrialised public housing?", in *Techne | Journal of Technology for Architecture and Environment*, vol. 26, pp. 103-112. [Online] Available at: doi.org/10.36253/techne-14504 [Accessed 8 April 2026].

Block, M., Perriccioli, M. and Rossi-Schwarzenbeck, M. (2019), "Processi Digitali per la Riqualificazione dell'Edilizia Sociale in Plattenbau | Digital Processes for the Redevelopment of Social Housing in Plattenbau", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 5, pp. 101-108. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/5112019 [Accessed 8 April 2026].

Bologna, A. (2021), "Verso una teoria della progettazione nell'era della crisi climatica", in *Archi | Rivista svizzera di architettura, ingegneria ed urbanistica*, vol. 3, pp. 13-17. [Online] Available at: hdl.handle.net/11573/1552491 [Accessed 8 April 2026].

Boughton, J. (2023), *A History of Council Housing in 100 Estates*, RIBA Publishing, London.

Cangelli, E. (2025), "Rigenerazione urbana e SDG – Approcci progettuali per la riduzione delle disuguaglianze urbane | Urban regeneration and SDGs – Design approaches for reducing urban inequalities", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 17, pp. 28-41. [Online] Available at: doi.org/10.69143/2464-9309/1712025 [Accessed 8 April 2026].

Cellamare, C. (ed.) (2016), *Fuori raccordo – Abitare l'altra Roma*, Donzelli, Roma.

Ciorra, P. and Marini, S. (eds) (2011), *Re-cycle – Strategie per l'architettura, la città e il pianeta*, Electa, Milano.

Dell'Acqua, F. and Sansò, C. (eds) (2022), *Periferie e residenza pubblica in Italia – Gli anni 1945-2000 – Progetti, processi, idee di città*, Maggioli Editore, Santarcangelo di Romagna.

Di Giorgio, G. (2011), *L'alloggio ai tempi dell'edilizia sociale – Dall'Ina-Casa ai PEEP*, Edilstampa, Roma.

Druot, F., Lacaton, A. and Vassal, J.-P. (2007), *Plus – La vivienda colectiva – Territorio de excepción*, Gustavo Gili, Barcelona.

Ginelli, E. and Castiglioni, L. (2012), "Perché valorizzare e riqualificare il patrimonio di edilizia residenziale pubblico | Why enhance and upgrade the public housing assets", in *Techne | Journal of Technology for Architecture and Environment*, vol. 4, pp. 79-84. [Online] Available at: doi.org/10.13128/Techne-11497 [Accessed 8 April 2026].

Graf, F. (2014), *Historie matérielle du bâti et projet de sauvegarde – Devenir de l'architecture moderne et contemporaine*, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne.

Graf, F. and Marino, G. (eds) (2016), *Les dispositifs du confort dans l'architecture du XXe siècle – Connaissance et stratégies de sauvegarde | Building environment and interior comfort in 20th-century architecture – Understanding issues and developing conservation strategies*, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne.

Guidetti, E. (2025), *The Potential of Form – How to Transform Existing Buildings in Post-functional Europe*, Jovis, Berlin.

Habraken, N. J. (1999), *Supports – An Alternative to Mass Housing*, Routledge, London. [Online] Available at: doi.org/10.4324/9781003014713 [Accessed 8 April 2026].

Jessen, J. and Schneider, J. (2006), "La conversione – Un tema corrente", in Schittich, C. (ed.), *Ristrutturazioni – Riuso, completamento, nuova progettazione*, Birkhäuser, München, pp. 10-21. [Online] Available at: api.pageplace.de/ preview/DT0400.9783034615150_A20658119/preview-9783034615150_A20658119.pdf [Accessed 8 April 2026].

Lepratto, F. (2024), "Fine-Tuning the Intensity of Modifications to Revitalize Brutalist Mass Housing", in *The Plan Journal*, vol. 9, issue 1, pp. 103-128. [Online] Available at: doi.org/10.15274/tpj.2024.09.01.7 [Accessed 8 April 2026].

Magnago Lampugnani, V. (2016), "Cinque proposte per costruire in tempi incerti | Five proposals for building in uncertain times", in *Domus*, issue 1000, March, pp. 66-76. [Online] Available at: elearning.uniroma1.it/pluginfile.php/623965/mod_resource/content/1/Lampugnani_Domus_1000/65-75_LAMPUGNANI.pdf [Accessed 8 April 2026].

Maldonado, T. (1978), "Roma – Le periferie", in *Casabella*, issue 438, pp. 40-41.

Migotto, A. and Tattara, M. (eds) (2023), *Contested Legacies – Critical Perspectives on Postwar Modern Housing*, Leuven University Press, Leuven. [Online] Available at: doi.org/10.11116/9789461665140 [Accessed 8 April 2026].

Nelson, A. and Schneider, F. (eds) (2019), *Housing for Degrowth – Principles, Models, Challenges and Opportunities*, Routledge, London.

Ortega, L. (2017), *The Total Designer – Authorship in the Architecture of the Post-digital Age*, Actar Publisher, Barcelona.

Osello, A., Zucco, M., Iacono, E. and Del Giudice, M. (2024), "Logiche nascoste della complessità – Interfacce grafiche e algoritmi per il sistema edificio | Hidden logic of complexity – Graphical interfaces and algorithms for the building system", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 16, pp. 202-211. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/16172024 [Accessed 8 April 2026].

Paganin, G., Talamo, C., Atta, N. and Tinelli, E. (2024), "Riuso di componenti edilizi – Sistema di valutazione a supporto delle decisioni negli interventi di ridistribuzione interna | Reuse of building components – Assessment system to support decisions in indoor re-layout interventions", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 15, pp. 266-275. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/15212024 [Accessed 8 April 2026].

Paris, S. and Bianchi, R. (2018), *Ri-abitare il moderno – Il progetto per il rinnovo dell'housing*, Quodlibet, Macerata.

Petzet, M. and Heilmeyer, F. (eds) (2012), *Reduce Reuse Recycle – Architecture as Resource – German Pavilion – 13th International Architecture Exhibition – Architecture Biennale Venice 2012*, Hatje Cantz, Berlin.

Picon, A. (2010), *Digital Culture in Architecture – An Introduction for the Design Professions*, Birkhäuser, Basel.

Picon, A. (2022), "Digital technology and architecture – Towards a symmetrical approach", in *Technology | Architecture + Design*, vol. 6, issue 1, pp. 10-14. [Online] Available at: doi.org/10.1080/24751448.2022.2040297 [Accessed 8 April 2026].

Plevoets, B. and Van Cleempoel, K. (2019), *Adaptive Reuse of the Built Heritage – Concepts and Cases of an Emerging Discipline*, Routledge, London.

Reichlin, B. and Pedretti, B. (eds) (2011), *Riuso del patrimonio architettonico*, Mendrisio Academy Press, Mendrisio.

Secchi, B. (2013), *La città dei ricchi e la città dei poveri*, Laterza, Bari.

Sennett, R. (2018), *Costruire e abitare – Etica per la città*, Feltrinelli, Milano.

Severino, E. (2021), *Tecnica e architettura*, Mimesis, Milano.

ARCHITECTURE
Research & Experimentation

AGATHÓN – International Journal of Architecture, Art and Design | n. 19 | 2026 | pp. 246-261
ISSN print: 2464-9309 – ISSN online: 2532-683X | doi.org/10.69143/2464-9309/19142026

Article Info

Received 15 March 2026
Revised 30 April 2026
Accepted 1 May 2026
Published 30 June 2026

BIOFILIA E RIGENERAZIONE URBANA
Soluzioni Tech-NbS stampate in 3D per microinterventi resilienti

BIOPHILIA AND URBAN REGENERATION
3D-printed Tech-NbS for resilient micro-interventions

Rosa Romano, Elisa Mazzoni

Abstract

L'articolo presenta il quadro metodologico e i primi esiti sperimentali della ricerca Urban Bloomers, finanziata dal bando UniFI Extra 2025 – Public Engagement, dedicata allo sviluppo di sistemi di facciata vegetata riconducibili a soluzioni tecnologiche basate sulla natura, stampati in 3D in argilla e co-progettati con attori istituzionali, imprese, ricercatori e comunità scolastiche per interventi di rigenerazione orientati alla biodiversità negli spazi ricreativi scolastici dell'area mediterranea. Attraverso l'analisi dello stato dell'arte, l'organizzazione di attività partecipate di osservazione, identificazione e mappatura delle specie, workshop di co-progettazione, modellazione parametrica e prototipazione additiva la ricerca definisce criteri progettuali, costruttivi ed ecologici per lo sviluppo di moduli biofilici capaci di integrare specie vegetali tolleranti agli stress climatici, migliorare il microclima e sostenere processi di apprendimento ambientale. Gli esiti preliminari restituiscono un framework metodologico replicabile e lo sviluppo di un primo prototipo di sistema di facciata Living Wall System tecnologico, orientato all'integrazione tra prestazioni ecologiche, qualità dello spazio educativo e applicazione in situ.

The article presents the methodological framework and the first experimental outcomes of Urban Bloomers, a research project funded through the UniFI Extra 2025 – Public Engagement call and dedicated to the development of vegetated façade systems as technology-enabled Nature-based Solutions, 3D printed in clay and co-designed with institutional actors, companies, researchers, and school communities for biodiversity-oriented regeneration interventions in Mediterranean school recreational spaces. Through a state-of-the-art analysis, participatory activities for the observation, identification, and mapping of species, co-design workshops, parametric modelling, and additive prototyping, the research defines design, construction, and ecological criteria for the development of biophilic modules capable of integrating climate-stress-tolerant plant species, improving the microclimate, and supporting environmental learning processes. The preliminary outcomes provide a replicable methodological framework and the development of a first prototype of a Living Wall System (LWS) façade, oriented towards integrating ecological performance, the spatial quality of educational environments, and in situ application.

Keywords

manifattura additiva, soluzioni basate sulla natura, sistemi di facciata, biodiversità, coinvolgimento di comunità scolastiche

additive manufacturing, nature-based solutions, façade systems, biodiversity, engagement of school communities

Rosa Romano, Architect and PhD, is an Associate Professor at the Department of Architecture, University of Florence (Italy). A member of the Scientific Committee of the ABITA Centre and an independent expert for the European Community, she conducts research on bioecological architecture and innovative environmental technologies, with particular attention to the management of complex building processes and the design of innovative components for the building envelope. E-mail: rosa.romano@unifi.it

Elisa Mazzoni, Architect and PhD Candidate at the Department of Architecture, University of Florence (Italy), conducts research on the upgrading of public buildings through the design of modular, regenerative, and multispecies building envelopes. Her professional experience includes environmental design and the 3D printing of architectural components made from natural and waste materials. E-mail: elisa.mazzoni1@unifi.it

Nel quadro della transizione ecologica lo sviluppo di sistemi di facciata ispirati ai principi del design biofilico, realizzati con materiali a basso impatto ambientale e concepiti per ospitare specie vegetali e animali, rappresenta una delle sfide più rilevanti per il settore delle costruzioni. Numerosi studi evidenziano infatti come l'involucro architettonico possa assumere un ruolo strategico nel supportare la resilienza delle città contemporanee, sempre più esposte a processi di densificazione, perdita di biodiversità e alterazione delle condizioni microclimatiche, con ricadute significative sulla qualità ambientale e sulla salute umana (Longato et alii, 2023; Wei et alii, 2023; Coccia, Cipolletti and Corvaro, 2024).

In tale scenario risulta necessario ideare nuovi sistemi di involucro concepiti come infrastrutture tecnologiche adattive, capaci di mediare i flussi energetici tra ambiente costruito ed ecosistema urbano e di contribuire alla regolazione del comfort indoor e outdoor, alla mitigazione climatica e alla riqualificazione ecologica dello spazio urbano sia negli interventi di nuova costruzione sia nei processi di retrofit profondo (Ascione et alii, 2020; Riley, 2017). Tale prospettiva implica il superamento di una concezione meramente prestazionale dell'involucro a favore di un'interpretazione più ampia, in cui la componente edilizia, il supporto biologico e i servizi ecosistemici concorrano alla definizione di dispositivi multi-performanti.

A questa evoluzione contribuiscono in modo significativo le innovazioni riconducibili ai paradigmi dell'Industria 5.0, alle tecnologie abilitanti e, in particolare, ai processi di progettazione computazionale e di fabbricazione additiva, che consentono un controllo avanzato della geometria, della composizione materica e delle modalità di integrazione tra componenti passivi, vegetazione e sistemi di supporto (European Commission, 2024; Lolli et alii, 2023; Camacho et alii, 2018; El-Sayegh, Romdhane and Manjikian, 2020; Gasparini, 2023). In tale quadro la fabbricazione digitale applicata ai materiali naturali, e in particolare all'argilla, apre nuove possibilità per la realizzazione di componenti bioinformati, modulari e adattabili, in grado di coniugare personalizzazione, riduzione degli scarti, producibilità e integrazione ecologica.

Questa convergenza tecnologica e ambientale apre la strada allo sviluppo di soluzioni tecnologiche basate sulla natura (Tech-NbS), intese come sistemi ibridi nei quali le componenti biologiche, fisiche e, nei casi più avanzati sensoristiche, cooperano per ottimizzare prestazioni ambientali, gestione delle risorse e servizi ecosistemici (Snep et alii, 2020; Mahmoud et alii, 2024; Kõiv et alii, 2024). Alla scala edilizia tali soluzioni trovano una delle applicazioni più promettenti nei Living Wall Systems (LWS), la cui evoluzione verso configurazioni orientate alla biodiversità consente di ripensare l'involucro come interfaccia ecologica attiva, capace di supportare specie vegetali resilienti allo stress climatico, migliorare il microclima locale e contribuire alla rigenerazione di superfici verticali in contesti urbani consolidati.

È in questo quadro che si colloca Urban Bloomers, una ricerca sviluppata attraverso una collaborazione inter- e transdisciplinare tra architetti, biologi, agronomi, imprese e attori istituzionali. Il progetto assume gli spazi ricreativi scolastici come dispositivi sperimentali di rigenerazione urbana e indaga il potenziale dei sistemi LWS di tipo Tech-NbS, stampati in 3D in argilla e co-progettati con la comunità. L'articolo presenta il framework metodologico della ricerca, i criteri progettuali emersi dall'analisi dello stato dell'arte e i primi esiti della sperimentazione condotta su un prototipo di facciata biofilica (The Dome Wall) destinato a essere integrato in una scuola secondaria di primo grado del Comune di Firenze. In particolare il paper mostra come l'integrazione tra design partecipativo, manifattura additiva, validazione biologica e applicazione in situ possa sostenere lo sviluppo di componenti di involucro orientati alla biodiversità per la rigenerazione urbana a scala reale.

Con questa ambizione il contributo è articolato in tre obiettivi specifici: 1) definire un quadro metodologico replicabile per la progettazione di componenti di involucro biofilici mediante processi di fabbricazione additiva e approcci partecipativi; 2) verificare la fattibilità tecnica, costruttiva ed ecologica di moduli in argilla stampati in 3D come interfacce ecologiche attive a scala reale; 3) identificare condizioni di trasferibilità del sistema in altri contesti scolastici e urbani del bacino mediterraneo.

Dopo un'analisi critica dello stato dell'arte, finalizzata a costruire un quadro sinottico relativo all'evoluzione dei Vertical Greening Systems verso configurazioni Tech-NbS, l'articolo presenta l'approccio metodologico adottato, basato sull'integrazione di strategie di Citizen Science e Public Engagement finalizzate a condividere con gli utenti finali le scelte progettuali e ambientali sviluppate in tutte le fasi del processo creativo per arrivare a definire le caratteristiche del sistema di facciata The Dome (Basnou et alii, 2020; Dallere and Tempestini, 2024). La trattazione prosegue con la presentazione del workflow che ha portato alla realizzazione del prototipo, da installare nella Scuola Carducci, sviluppato mediante processi di modellazione computazionale e manifattura additiva.

Infine, poiché la ricerca è ancora in corso, dopo una breve trattazione degli indicatori prestazionali identificati per misurare i risultati raggiunti in termini ambientali ed ecologici, attraverso una fase di monitoraggio che partirà nei prossimi mesi, il paper conclude con una discussione critica dei limiti e delle potenzialità del lavoro svolto, evidenziando scenari di fine vita e prospettive di replicabilità.

I riconoscimenti ottenuti dal progetto Urban Bloomers, selezionato come esempio di eccellenza e innovazione nell'ambito del New European Bauhaus Festival 2026, testimoniano la sua rilevanza scientifica nel dibattito internazionale. In particolare il progetto punta a: 1) colmare un gap identificato nella letteratura sui sistemi vegetati di facciata, dove la transizione da artefatti sperimentali a componenti validati a scala reale rimane ancora limitata (Riley, 2017; Ascione et alii, 2020; Irga et alii, 2023); 2) definire framework progettuali originali per lo sviluppo di Tech-NbS bioinformate (Snep et alii, 2020; Mahmoud et alii, 2024) realizzabili con processi di manifattura additiva utilizzando materiali naturali (Gyawali et alii, 2024; Aronne et alii, 2026); 3) contribuire a diffondere la consapevolezza sui temi ambientali e sulle discipline scientifico-tecnologiche STEM (scienza, tecnologia, ingegneria e matematica) tra le giovani generazioni attraverso azioni di partecipazione e co-design (Tiago, Evaristo and Pinto, 2024; O'Donnell et alii, 2025; Berretta, Desideri and Staltari, 2024).

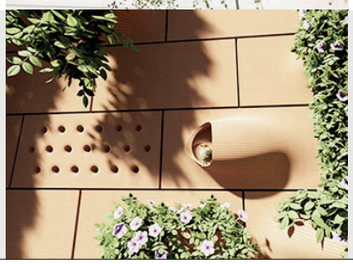
La ricerca Urban Bloomers | La ricerca Urban Bloomers – Fiorire in Città – Educazione e Co-progettazione per Trasformare la Città in un Ecosistema Resiliente e Biodiverso, finanziata nell'ambito del bando UniFI Extra 2025 – Public Engagement dell'Università di Firenze, è stata sviluppata attraverso una collaborazione che ha coinvolto i Dipartimenti di Architettura (DIDA), Biologia (BIO) e Scienze e Tecnologie Agrarie, Alimentari, Ambientali e Forestali (DAGRI), il Green Office dell'Università di Firenze, la Regione Toscana, il Comune di Firenze, due imprese attive nel settore della manifattura additiva (Kentstrapper e r3direct) e due organizzazioni nazionali con consolidata esperienza nelle pratiche di citizen science (Citizen and Science Italia e l'Accademia Italiana di Scienze Forestali).

In coerenza con le finalità del bando la ricerca ha assunto come obiettivo prioritario l'attivazione di forme di partecipazione attiva della comunità, capaci di produrre ricadute sociali, culturali ed educative sul territorio; in tale prospettiva il progetto ha orientato le proprie attività verso il coinvolgimento di giovani cittadini, in particolare adolescenti di età compresa tra 10 e 13 anni, nei processi di rigenerazione dello spazio urbano, assumendo la scuola non soltanto come luogo della formazione, ma anche come presidio di sostenibilità, innovazione e sperimentazione ambientale.

Il progetto ha individuato come casi studio due scuole secondarie di primo grado del Comune di Firenze – la Scuola media Carducci, nel Quartiere 1, e la Scuola media Manzoni, nel Quartiere 5 – nei cui ambienti esterni sono stati sviluppati due Vertical Green Systems (VGS) realizzati mediante processi di stampa 3D. Lo spazio ricreativo scolastico è stato quindi interpretato come micro-laboratorio urbano in cui verificare la possibilità di integrare innovazione tecnologica, progettazione partecipata, biodiversità e qualità ambientale in un unico dispositivo funzionale e didattico.

Dal punto di vista operativo Urban Bloomers si è articolato in tre momenti tra loro complementari: a) una fase conoscitivo-divulgativa finalizzata al trasferimento di conoscenze di base sui temi della rigenerazione dello spazio pubblico, delle infrastrutture verdi urbane, dei materiali naturali e riciclati e delle tecnologie innovative per l'involucro; b) una fase applicativa incentrata su attività di co-progettazione, prototipazione e confronto con i partner tecnici e istituzionali; c) una fase conclusiva di restituzione e diffusione e dedicata alla condivisione pubblica dei risultati, dei prototipi sviluppati e delle prospettive di trasferimento del progetto. Urban Bloomers ha quindi sperimentato una metodologia di ricerca applicata per trasferire conoscenze in ambito progettuale sostenibile e biologico al di fuori del contesto accademico, valorizzando il ruolo delle scuole come ecosistemi di apprendimento e come spazi da riqualificare secondo i principi del design biofilico e delle infrastrutture verdi urbane. I risultati conseguiti evidenziano la capacità del progetto di generare un impatto che vada oltre la dimensione sperimentale (in accordo con l'SDG 11 che mira a rendere le città e gli insediamenti umani inclusivi, sicuri, duraturi e sostenibili): le attività svolte hanno infatti coinvolto studenti, soggetti istituzionali, imprese e ricercatori in un processo condiviso che ha posto le basi per lo sviluppo successivo di sistemi di facciata biofilici modulari, scalabili e contestualmente adattabili (Valente et alii, 2024).

Tech-NbS stampate in 3D | Nella fase iniziale del progetto Urban Bloomers è stato condotto uno stu-

Year	Image	Project	System typology	TRL	Material	Scale
2014		CELLA Ecoid Singapore	Art installation	–	Plastic polymer	Small design object
2018		Cabin of 3D-printed Curiosities Emerging Objects Oakland, CA, USA	LWS	9	Clay and cement-based material added with natural fibres	Façade component
2018		Voronoi wall Saxion Industrial Design Research Group, De Witte van der Heijden Architecten Twente, The Netherlands	LWS	7	Concrete	Façade component
2019		BANYAN Eco Wall NOWLAB, BigRep's innovation consultancy Berlin, Germany	Design object	7	Plastic polymer	Large stand-alone design piece
2019		Cyber Green Voltaics Iaac Barcelona Barcelona, Spain	LWS	4	Clay	Façade component
2020		Nature Clouds Daniel Pouzet, Branch Technology Chicago, IL, USA	Art installation	–	Plastic polymer	Large design piece
2020		NEST Atelier Entropic Barcelona, Spain	LWS	3	Clay	Façade component

Tab. 1a | Comparative framework of international case studies concerning 3D-printed façade components integrated with vegetation, classified according to material, scale, technological maturity level, system typology, and degree of system transferability (credit: the Authors, 2026).

Year	Image	Project	System typology	TRL	Material	Scale
2020		Vertical Food Farm Iaac Barcelona Barcellona, Spain	LWS	5/6	Clay	Façade component
2021		Nàdarra Berry Wark Dubai, United Arab Emirates	Art installation	–	Sand mixture	Large design piece for wall application
2022		FloraVoltaica Iaac Barcelona Barcelona, Spain	LWS	4	Photocatalytic materials	Façade component
2023		Biomic wall University of Innsbruck, exparch.hochbau, ceraLAB Innsbruck, Austria	LWS	5/6	Clay	Façade component
2023		Aeroponic Aggregate op.AL New York, USA	Urban garden	7	Clay	Large urban furniture
2023		Brick By Bit Victoria Roznowski Berlin, Germany	LWS	3	Clay	Façade component
2024		Green Klinkers Alexander Wolf, Simon Bauer, Ulrich Knaack, TU Darmstadt Darmstadt, Germany	LWS	4	Clay	Façade component
2025		Green wall Studio RAP Rotterdam, The Netherlands	LWS	5/6	Clay	Façade component

Tab. 1b | Comparative framework of international case studies concerning 3D-printed façade components integrated with vegetation, classified according to material, scale, technological maturity level, system typology, and degree of system transferability (credit: the Authors, 2026).



Photograph taken during the mini-bioblitz organised in Florence in search for solitary insects and spontaneous plants



Co-design phase for components of Living Wall Systems integrated with stress-resistant plants, in collaboration with students from Carducci Middle School



Modelling phase using clay and DAS to create biophilic façade components, carried out by the middle school students



3D printing workshop organised in collaboration with r3direct and Kentstrapper SMEs at the Department of Architecture, University of Florence

Fig. 1 | Images from the participatory design phase with students from Manzoni and Carducci Middle Schools (credit: the Authors, 2026).

dio conoscitivo per ricostruire l'evoluzione dei sistemi tradizionali di parete verde, storicamente concepiti come apparati vegetali prevalentemente decorativi, verso componenti di facciata bioinclusivi e multi-performanti, capaci di generare benefici ambientali, ecologici e sociali. L'analisi preliminare dello stato dell'arte ha evidenziato che i Vertical Green Systems (VGS) si possono ricondurre a due categorie principali, le facciate verdi e i Living Wall Systems. Le facciate verdi, sviluppate come soluzioni relativamente semplici e accessibili sotto il profilo tecnico-economico, si basano sull'utilizzo di grigliati, reti o strutture a cavo che sostengono la crescita di piante rampicanti il cui apparato radicale è alloggiato a terra o in grandi vasi. Tali sistemi, i cui benefici termoigrometrici e gli effetti di controllo microclimatico, pur documentati, risultano generalmente contenuti, sono impiegati soprattutto per qualificare visivamente superfici murarie nuove o esistenti (Perini and Rosasco, 2013; Radic, Brkovic Dodig and Auer, 2019; Irga et alii, 2023; Radujkovic, Versele, and Breesch, 2024).

I Living Wall Systems (LWS), concepiti come Tech-NbS verticali, sono realizzati con pannelli modulari che combinano substrato e vegetazione e possono essere integrati come finitura esterna di chiusure verticali opache. Oltre che incidere sull'immagine architettonica dell'edificio tali sistemi contribuiscono al miglioramento delle prestazioni termiche e del comfort indoor e outdoor, grazie al contributo dato dalle piante alla riduzione delle temperature superficiali esterne dell'apparato murario, mediante l'attivazione di processi di raffrescamento per evapotraspirazione ed alla qualità dell'aria esterna.

Più complessi e costosi delle facciate verdi i LWS incorporano il substrato colturale direttamente a parete e adottano una configurazione modulare che, congiuntamente all'integrazione di sistemi di irrigazione puntuale, consente la pre-vegetazione in vivaio prima della posa in opera, la sostituzione selettiva dei moduli in fase manutentiva e l'impiego di una più ampia gamma di specie vegetali, generando ricadute positive sulla creazione di microhabitat urbani con potenziale di connettività ecologica (Qiao, 2025; Nasr et alii, 2024; Radujkovic, Versele and Breesch, 2024; Lunt et alii, 2025).

I casi studio analizzati hanno evidenziato come per quest'ultima categoria l'impiego di materiali a basso impatto ambientale e ad alta albedo, congiuntamente all'adozione di tecnologie innovative come la stampa 3D, rende possibile la realizzazione di moduli bioispirati caratterizzati da geometrie organiche, rugosità differenziata e configurazioni adattive. La manifattura additiva assume in tal senso un ruolo strategico, poiché consente di tradurre simultaneamente requisiti biologici e geometrici in componenti tecnologici di facciata, riducendo la complessità costruttiva e manutentiva dei sistemi tradizionali e abilitando, attraverso processi parametrici, la replicabilità del sistema, la sua adattabilità a superfici e contesti climatici differenti e la produzione di varianti personalizzate a costi comparabili alla produzione seriale (Camacho et alii, 2018; El-Sayegh, Romdhane and Manjikian, 2020; Turrin, de Ruiter and Tenpierik, 2021).

Sulla base di questa ricognizione preliminare i LWS realizzati attraverso processi di stampa 3D sono stati scelti come ambito operativo di riferimento della ricerca Urban Bloomers poiché rappresentano la categoria in cui le prestazioni tipiche dei componenti edilizi di chiusura verticale, dei supporti biologici e dei servizi ecosistemici convergono nella creazione di unico dispositivo multi-performante, capace di operare come interfaccia ecologica attiva sia alla scala architettonica che a quella micro-urbana (Santi et alii, 2020; Bologna and Hasanaj, 2023; Ayad et alii, 2025).

Partendo da questo presupposto l'analisi si è spostata sullo studio di dettaglio di casi studio di LWS realizzati nell'ultimo decennio con l'obiettivo di comprendere come il processo realizzativo, la configurazione geometrica, la tipologia di vegetazione e i sistemi di supporto siano stati declinati per garantire il raggiungimento di prestazioni ambientali ed ecologiche elevate (Tab. 1).

Gli esempi selezionati sono stati oggetto di indagine approfondita condotta attraverso interviste e contatti diretti con i progettisti e le aziende interessate, ai quali è stato chiesto di fornire le informazioni necessarie a compilare delle schede di indagine suddivise nelle seguenti sezioni esplorative:
1) Overview del sistema, descrizione sintetica del caso studio, comprensiva dell'indicazione del sito di installazione, del progetto di ricerca di riferimento, della fonte di finanziamento e del team di sviluppo;
2) Dati tecnologici dei sottocomponenti relativi alla descrizione delle caratteristiche costruttive e materiche del sistema (famiglia, composizione e origine del materiale, potenziale di circolarità, approccio progettuale, prestazioni termoigrometriche dell'involucro, dimensioni geometriche, trattamenti superficiali, sistemi di fissaggio) e al livello di maturità tecnologica raggiunta;
3) Processo di manifattura additiva adottato, contenente specifiche sulla fase realizzativa, dalla progettazione (parametrica, algoritmica, generativa, CAD) alla fase di stampa (famiglia di stampa, tipologia di stampante utilizzata) fino alle lavorazioni post-processo;

4) Dotazioni impiantistiche relative alla presenza e alla tipologia dei sistemi di irrigazione e di monitoraggio installati;
5) Vegetazione integrata inerente alle scelte botaniche e progettuali per l'implementazione di sistemi vegetali e, quindi, di specie, substrato, geometria di innesto, metodologia e stadio di vita della pianta al momento della posa in opera.

La comparazione analitica dei 15 casi studio selezionati ha consentito di raggruppare le applicazioni in tre gruppi in relazione alla finalità progettuale, al livello di maturità tecnologica e alla capacità di integrare prestazioni ambientali, vegetazione e processi di fabbricazione additiva. Un primo gruppo di applicazioni – CELLA (Miller, 2014), BANYAN Eco Wall (Delfosse, 2025; Chahin et alii, 2022), Nature Clouds (Thompson, 2020) e Nadarra[1] – è stato concepito prevalentemente come installazioni artistiche o oggetti di design, privilegiando la sperimentazione formale e l'impatto visivo rispetto al conseguimento di prestazioni ambientali quantificabili. In tali esperienze si registra prevalentemente l'utilizzo di polimeri plastici lavorati per estrusione a caldo e di miscele sabbiose e terrose stampate per estrusione a freddo, materiali particolarmente indicati per realizzare forme complesse a piccola scala.

Un secondo gruppo di sperimentazioni – Cyber Green Voltaics[2], NEST[3], Green Klinkers (Wolf, Bauer and Knaack, 2024), Brick by Bit[4] e FloraVoltaica[5] – comprende sistemi sviluppati nell'ambito di ricerche che ricorrono a modellazione parametrica e algoritmica, esplorando il potenziale di utilizzo di materiali a base di argilla o fotocatalitici nella definizione di componenti capaci di ospitare la vegetazione e, nei casi più avanzati, di integrare sistemi di monitoraggio e produzione energetica. Sebbene tali sperimentazioni abbiano prodotto risultati promettenti sotto il profilo energetico-ambientale, esse si collocano ancora a livelli di maturità tecnologica medio-bassi (generalmente compresi tra TRL 3 e TRL 4), risultando prevalentemente limitate alla prototipazione di componenti e a test di laboratorio, senza una verifica consolidata in applicazioni edilizie a scala reale.

Un terzo gruppo di prodotti – Cabin of 3D-printed Curiosities[6], Co-Mida[7], Aeroponic Aggregate[8], Vertical Food Farm (Gyawali et alii, 2024), Biomic Wall sviluppato da Contala (Khan, 2023), Voronoi Wall[9] e il Green Wall[10] di Studio RAP – mostra infine come la ricerca sperimentale stia evolvendo verso la realizzazione di sistemi tecnologici modulari, scalabili e potenzialmente integrabili architettonicamente. La maturità tecnologica di questi casi studio si distribuisce su livelli intermedi o avanzati (con un TRL compreso tra 5 e 7). Nei casi a base terrea (quindi a esclusione del Voronoi Wall) l'ottimizzazione delle miscele materiche assume un ruolo centrale nel processo additivo: argille, fibre naturali e aggregati riciclati vengono impiegati per bilanciare stampabilità, stabilità strutturale, comportamento igroscopico e compatibilità chimico-fisica con i requisiti vitali delle specie vegetali integrate.

Analizzando in modo comparativo tutti i casi studio scelti è stato possibile identificare 5 indirizzi progettuali trasferibili al progetto dei sistemi di facciata Urban Bloomers e riconducibili ai criteri: 1) modularità e scalabilità; 2) impiego di materiali a basso impatto ambientale; 3) correlazione tra configurazione geometrica e tipologia di vegetazione integrata; 4) minimizzazione della dipendenza da sistemi attivi di irrigazione; 5) orientamento alla validazione in situ e alla trasferibilità.

Anche la scelta dell'argilla per la realizzazione del prototipo di facciata The Dome deriva dall'analisi delle prestazioni osservate nei progetti pilota, nei quali questo materiale si è dimostrato particolarmente adatto alla sperimentazione di processi di manifattura additiva e al supporto delle specie vegetali integrate, contribuendo a ridurre la dipendenza da sistemi di irrigazione attiva (Crawford et alii, 2022; Madrid et alii, 2023; Aronne et alii, 2026).

Approccio partecipativo Urban Bloomers | Nella fase di implementazione del progetto Urban Bloomers è risultato fondamentale sviluppare un modello originale di approccio partecipativo, capace di integrare competenze accademiche e industriali e conoscenze d'uso nella definizione di parametri progettuali applicabili alla rigenerazione dei microambienti scolastici e finalizzato a definire con gli utenti finali i criteri ambientali, biologici e costruttivi alla base dello sviluppo dei sistemi LWS Tech-NbS da realizzare nella fase applicativa della ricerca.

Perseguendo questo obiettivo la fase progettuale ha seguito il modello research-by-design ed è stata concepita come uno strumento conoscitivo, declinabile in tre momenti operativi complementari (Fig. 1): fase esplorativa, durante la quale sono stati organizzati dei BioBlitz configurati come eventi collaborativi di citizen science che hanno coinvolto esperti, ricercatori, volontari e cittadini nell'osservazione, identificazione e mappatura delle specie vegetali spontanee presenti nei quartieri in cui sorgono le scuole oggetto di studio (Tiago, Evaristo and Pinto, 2024); fase creativa articolata in workshop di co-design finalizzati a tradurre gli esiti conoscitivi emersi dai BioBlitz in criteri progettuali condivisi, attraverso attività di discussione guidata, mappatura delle esigenze, selezione delle specie e costruzione di scenari d'uso (Basnou et alii, 2020; O'Donnell et alii, 2025; Dallere and Tempestini, 2024); fase operativa finalizzata a promuovere – attraverso l'attivazione di un seminario tematico universitario dedicato – cicli iterativi di modellazione parametrica, test di fabbricazione e validazione biologica, durante la quale studenti, ricercatori e imprenditori hanno lavorato congiuntamente allo sviluppo esecutivo dei moduli Urban Bloomers.

Nel loro insieme tali attività hanno prodotto tre principali esiti: un repertorio floristico georiferito delle specie vegetali spontanee presenti nei quartieri delle scuole coinvolte; un insieme di requisiti progettuali condivisi; configurazioni morfologiche e geometriche dei sottocomponenti di involucro pensate per bilanciare vincoli fabbricativi, requisiti architettonici e prestazioni biologiche.

Il processo co-progettuale adottato (Fig. 2), in accordo con l'SDG 4 (che mira a garantire un'istruzione di qualità, equa e inclusiva, promuovendo opportunità di apprendimento permanente per tutti), ha permesso di raggiungere risultati rilevanti in termini: a) cognitivo-educativi grazie al coinvolgimento attivo di studenti e cittadini nella mappatura della biodiversità, nella selezione delle specie e nella progettazione dei componenti di facciata; b) contestuali-ecologici mediante l'integrazione di conoscenze localizzate nella fase progettuale utili alla definizione geometrica dei moduli ed alla selezione delle specie vegetali integrabili che hanno riguardato l'identificazione e l'utilizzo di configurazioni d'uso dello spazio, indicatori di discomfort termico e specificità microclimatiche degli ambienti ricreativi scolastici c) operativo-sistemici identificando già in fase progettuale vincoli manutentivi, strategie irrigue, requisiti di accessibilità e criticità legate alla durabilità del manufatto tecnologico. I risultati conseguiti attraverso l'approccio partecipativo hanno

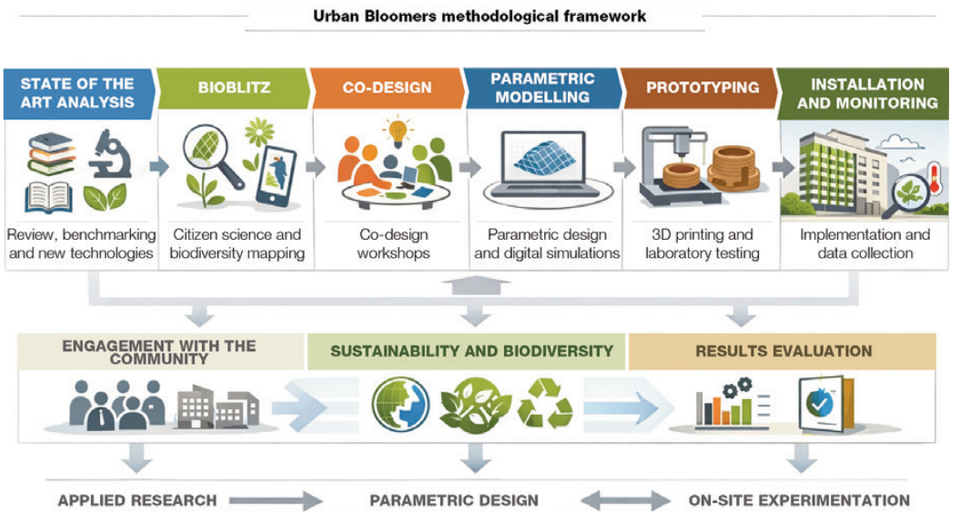


Fig. 2 | Diagram of the methodological framework of the Urban Bloomers research project (credit: the Authors, 2026).

permesso di promuovere il confronto iterativo tra saperi esperti e conoscenze situate, producendo una coerenza progettuale verificata nel contesto reale di applicazione della fase successiva di prototipazione.

Il sistema LWS The Dome Wall per la Scuola media Carducci | Tra i prototipi sviluppati nell'ambito della ricerca il sistema The Dome Wall può essere considerato il caso studio più significativo ai fini della verifica del passaggio dalla sperimentazione progettuale all'applicazione in situ. Si tratta della soluzione tecnologica di parete verde, progettata per essere installata nello spazio ricreativo della terrazza di copertura della Scuola secondaria di primo grado Giosuè Carducci (Fig. 3). L'edificio, situato nel centro storico di Firenze, è sottoposto a vincolo paesaggistico e si inserisce in un contesto urbano di elevato valore storico-monumentale, caratterizzato dalla prossimità visiva con numerose emergenze architettoniche, tra cui l'iconica Cupola di Santa Maria del Fiore, visibile dallo spazio scelto per l'installazione del prototipo.

Con l'obiettivo di rispettare i vincoli paesaggistici e formali di questo particolare contesto senza adottare una logica mimetica, il progetto del componente di facciata è stato sviluppato rielaborando i motivi geometrici del tamburo brunelleschiano – oculi, riquadrature e rapporti tra cerchio, rettangolo e quadrato – e traducendoli in un linguaggio parametrico capace di coniugare riconoscibilità figurativa, fabbricabilità e biorecettività.

In coerenza con gli indicatori progettuali identificati nella fase di analisi dello stato dell'arte e con gli SDG 13 e 15 (che mirano rispettivamente a combattere il cambiamento climatico e a proteggere gli ecosistemi terrestri) il sistema è stato sviluppato come un LWS Tech-NbS per supportare la crescita di specie vegetali resilienti agli stress climatici urbani, in particolare alle elevate temperature superficiali e alla siccità prolungata tipiche del clima mediterraneo. La strategia progettuale ha inteso la facciata come un'interfaccia ecologica attiva, capace di integrare aspetti architettonici, condizioni microclimatiche e prestazioni biologiche in un sistema modulare replicabile. Il progetto è stato sviluppato secondo una logica in cui configurazione geometrica, comportamento del materiale, specie vegetali, assemblaggio e manutenzione sono stati considerati parametri interdipendenti.

Il workflow digitale adottato ha previsto la definizione geometrica dei moduli in Rhinoceros 8 e la loro ottimizzazione per la stampa 3D in Grasshopper, così da controllare con precisione millimetrica la forma delle cavità, gli spessori, i rinforzi interni, l'incastro dei componenti e il successivo percorso di estrusione. Parallelamente rendering e fotoinserimenti hanno consentito di valutare ex ante l'impatto dei componenti sul prospetto della scuola e sul paesaggio, verificando la compatibilità tra innovazione tecnica e contesto, in accordo con l'SDG 9 che mira a costruire infrastrutture resilienti, promuovere l'industrializzazione inclusiva e sostenibile e favorire l'innovazione tecnologica.

Dal punto di vista costruttivo il sistema è stato concepito come un insieme limitato di famiglie modulari, adattabili parametricamente a differenti superfici di facciata. Nel caso della Scuola Carducci sono state progettate due tipologie di moduli in argilla (Fig. 4), di dimensioni 30 x 30 x 15 cm, entrambe riconducibili a una logica di assemblaggio di sottocomponenti stampabili, al fine di bilanciare precisione dimensionale, stabilità strutturale, facilità di posa e integrazione del substrato colturale.

Il primo modulo, con cavità centrale circolare, reinterpreta gli oculi del tamburo della cupola del Duomo di Firenze ed è destinato a ospitare specie vegetali a portamento cespuglioso e biomassa aerea contenuta, con apparati radicali compatti, quali 'Rosmarinus officinalis', 'Thymus vulgaris', 'Lavandula officinalis', 'Erica multiflora' e 'Helichrysum italicum'. Il secondo modulo, caratterizzato da una cavità orizzontale allungata, è stato progettato per garantire l'integrazione di piante prostrate o ricadenti, come la 'Portulaca oleracea', la 'Cymbalaria muralis' e il 'Rosmarinus officinalis prostratus', favorendo la continuità della copertura vegetale e l'incremento dell'ombreggiamento superficiale.

In entrambi i casi è stata posta particolare attenzione alla definizione delle geometrie di sezione e alla disposizione dei setti di irrigidimento, configurati per rispondere a due ordini di requisiti strutturali interdipendenti: prevenire fenomeni di collasso durante le fasi di stampa e garantire la rigidezza del modulo in vista dell'aggancio alla sottostruttura metallica in fase di messa in opera. Inoltre la disposizione dei setti ha permesso di stabilire un rapporto causale con i parametri biologici: in quanto elementi separatori essi definiscono l'ampiezza e la configurazione dei volumi cavi interni destinati all'integrazione del substrato terroso, condizionando così la profondità radicabile, la distribuzione dell'umidità e le condizioni di drenaggio. La verifica tec-

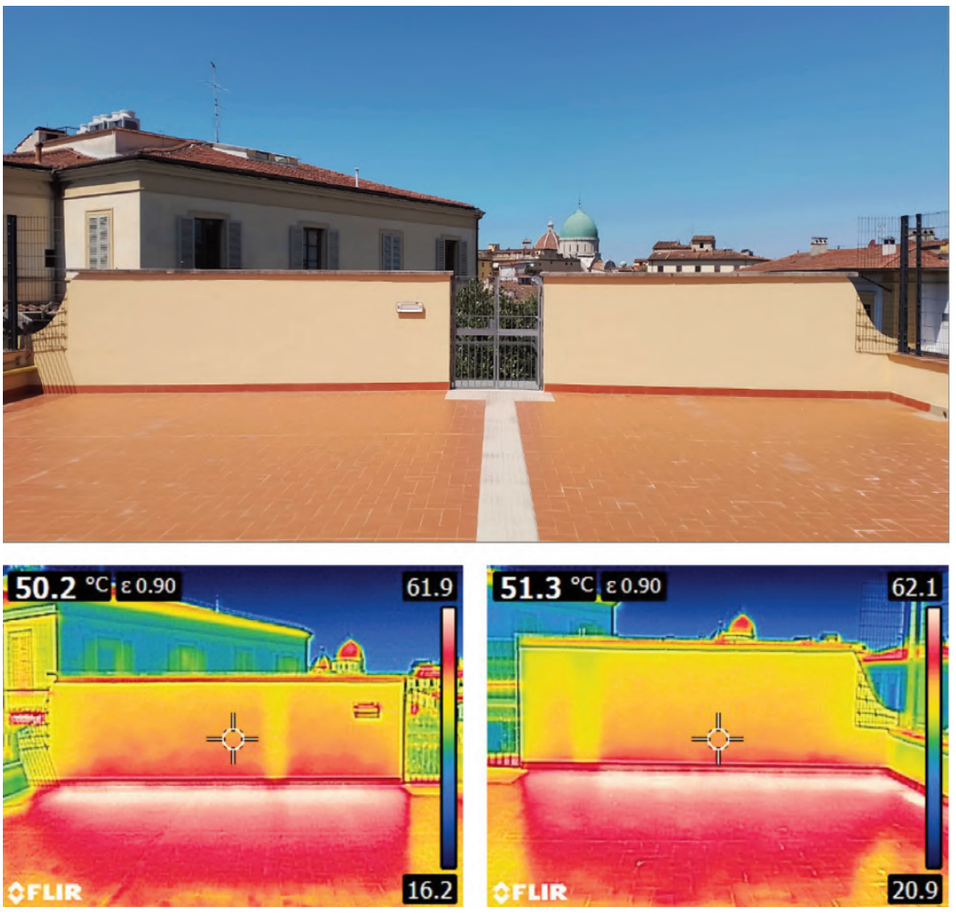


Fig. 3 | Preliminary microclimatic analysis of the Carducci Middle School terrace through photographic documentation and infrared thermographic surveys, aimed at identifying the surface thermal conditions of The Dome Wall system installation site (credit: the Authors, 2026).

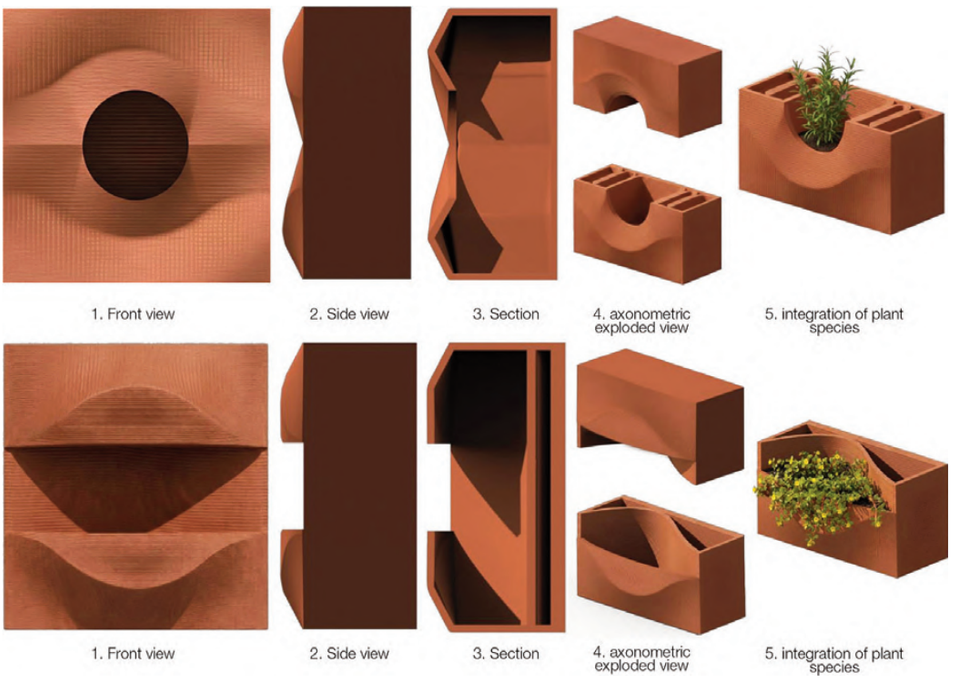


Fig. 4 | Concept of the two components of The Dome Wall modular façade system, with front views, side views, sections, exploded axonometries, and simulations of the integration of the main plant species envisaged (credit: the Authors, 2026).

nico-costruttiva del sistema ha evidenziato come le scelte geometriche influenzano direttamente anche la definizione della sottostruttura di supporto: l'analisi dei sistemi di fissaggio, condotta assumendo come riferimento un sistema standard in montanti e traversi in alluminio tipico delle facciate ventilate in cotto, ha mostrato che la ridotta altezza di alcuni sottocomponenti del modulo comporta un eccessivo addensamento dei binari orizzontali, rendendo necessaria la messa a punto di una sottostruttura alternativa (Fig. 5).

La prototipazione in scala reale è stata condotta presso l'azienda Ceramica Blu, con il supporto del partner r3direct, utilizzando la stampante WASP 40100 per il Liquid Deposition Modeling di un impasto di argilla bianca e acqua. In questa fase i modelli tridimensionali sono stati convertiti in G-code mediante slicing parametrico, consentendo il controllo della traiettoria di estrusione e la verifica preventiva di criticità legate alla continuità del deposito, agli sbalzi, ai tempi di asciugatura e ai ritiri del materiale. La fase di stampa ha quindi costituito non solo un momento realizzativo, ma anche una vera verifica sperimentale del processo di fabbricazione additiva, confermando che parametri quali stampabilità, stabilità allo stato crudo, comportamento in essiccazione e tolleranze post-cottura debbano essere governati fin dalle prime fasi della modellazione (Fig. 6).

Poiché il prototipo è destinato all'installazione in un contesto scolastico reale la manutenzione e la sicurezza sono state considerate requisiti progettuali primari. Il sistema è stato quindi configurato per una gestione a bassa intensità manutentiva, basata sull'irrigazione di emergenza al raggiungimento di soglie critiche di umidità, ispezioni programmate, verifica stagionale degli ancoraggi, eventuale reintegro del substrato e rimozione delle specie invasive. A tali accorgimenti si affiancano misure di sicurezza relative alla durabilità del sistema, alla prevenzione del rischio di caduta, alla compatibilità materica con il supporto murario e alla controllabilità delle operazioni di manutenzione.

Prestazioni attese e protocollo di monitoraggio | Il prototipo The Dome Wall è destinato a essere installato nel luglio 2026 nello spazio ricreativo della terrazza della Scuola Carducci (Fig. 7), avviando una fase di validazione in situ basata su un piano di monitoraggio comparativo tra condizioni pre e post-installazione, assumendo come riferimento anche una porzione di facciata esistente non sottoposta a riqualificazione. Per controllare le prestazioni del sistema è stato sviluppato un Protocollo di Monitoraggio (Tab. 2), strutturato per aree tematiche, indicatori, strumenti / metodi, frequenze di acquisizione, modalità di valutazione pre- e post-installazione ed esiti attesi

Per quanto riguarda gli aspetti microclimatici il monitoraggio è incentrato sugli indicatori di temperatura dell'aria, temperatura superficiale e umidità relativa, rilevati mediante sensori termici che saranno installati in prossimità della parete, sensori di termografia a infrarossi e sensori termo-igrometrici combinati. La frequenza di acquisizione è definita come campagna comparativa, articolata in una fase di valutazione pre-installazione (rilievo delle condizioni termo-igrometriche basali e analisi microclimatiche preliminari dello spazio oggetto di intervento) e in una fase di valutazione post-installazione (monitoraggio in prossimità della parete e nelle aree ad essa limitrofe). In coerenza con gli esiti attesi esplicitati nel protocollo, tali misure sono finalizzate a verificare la riduzione della temperatura dell'aria e delle temperature superficiali e l'incremento dell'umidità relativa locale, con ricadute sui parametri di comfort outdoor (Cui et alii, 2022; De Jesus et alii, 2017).

Parallelamente, secondo l'impostazione multi-indicatore del protocollo, si avvierà una campagna di valutazione ecologica finalizzata a rilevare i tassi di sopravvivenza delle piante, la percentuale di copertura e la fenologia della fioritura. La biodiversità faunistica sarà inoltre monitorata in termini di abbondanza e ricchezza tassonomica degli invertebrati, mediante protocolli di campionamento standardizzati (Montgomery et alii, 2021), coerentemente con l'impostazione multi-indicatore adottata (Valente et alii, 2024). Con riferimento agli aspetti del Life Cycle Assessment (LCA) Urban Bloomers integra una prospettiva di ciclo di vita sin dalla fase progettuale, in linea con le indicazioni metodologiche per la valutazione delle prestazioni ambientali dei sistemi a facciata verde (El-Zoklah and Refaat, 2021). La circolarità del sistema è infatti perseguita attraverso l'adozione di strategie progettuali orientate all'assemblaggio a secco finalizzate a garantire lo smontaggio dei componenti e di tutte le loro sotto-parti.

In accordo con l'SDG 12 (che mira a garantire modelli di consumo e produzione sostenibili) gli scenari di fine vita comprendono, in ordine decrescente nella gerarchia della circolarità, il reintegro a circuito chiuso degli scarti di argilla non cotta come materia prima in successivi cicli di stampa (Madrid et alii, 2023), il riutilizzo dei moduli in altri contesti applicativi e l'eventuale frantumazione di elementi danneggiati per produrre aggregato inerte utilizzabile come quota di materiale riciclato, in nuovi impasti ceramici (Velasco et alii, 2014).

Allo stato attuale il sistema si colloca in una fase di transizione dalla prototipazione alla validazione a scala reale; i successivi avanzamenti di maturità dipenderanno dai risultati del monitoraggio in situ, valutati rispetto agli indicatori e agli esiti attesi definiti nel protocollo di monitoraggio, dalla verifica della durabilità del sistema e dalla disponibilità di ulteriori risorse per eventuali processi di replicazione pre-commerciale.

Conclusioni | La ricerca Urban Bloomers mostra come lo sviluppo di sistemi LWS Tech-NbS stampati in 3D in argilla possa costituire una strategia credibile per la rigenerazione bioinclusiva degli spazi scolastici, a condizione che innovazione materica, progettazione parametrica, validazione biologica e co-design siano integrati in un unico processo metodologicamente strutturato. In questo quadro il contributo principale del lavoro non risiede soltanto nel prototipo sviluppato ma soprattutto nel-

la definizione di un framework replicabile per la trasformazione di superfici edilizie in microinfrastrutture ecologiche, didattiche e climaticamente responsive, applicabili in contesti urbani consolidati e potenzialmente trasferibili all'area mediterranea.

Dal punto di vista scientifico la ricerca contribuisce a indirizzare il dibattito sui sistemi vegetati di facciata in almeno tre direzioni: in primo luogo propone un approccio integrato che supera la separazione tra componente edilizio e supporto biologico, interpretando l'involucro come interfaccia ecologica attiva capace di concorrere simultaneamente alla mitigazione microclimatica, al sostegno della biodiversità e alla qualificazione dello spazio educativo; in secondo luogo definisce un metodo di lavoro in cui l'approccio partecipativo non assume una funzione accessoria ma contribuisce direttamente alla definizione dei requisiti ambientali, biologici, figurativi e manutentivi del sistema; in terzo luogo verifica il potenziale della progettazione parametrica come approccio per tradurre requisiti eterogenei – geometrici, costruttivi, ecologici e materici – in componenti modulari, adattabili e orientati al trasferimento tecnologico.

In tale prospettiva lo sviluppo dei due moduli del sistema di facciata The Dome Wall conferma il potenziale della manifattura additiva nel connettere il linguaggio architettonico, la funzionalità ecologica e i vincoli di fabbricazione. Il workflow computazionale e realizzativo messo a punto ha consentito di mantenere la coerenza tra geometria, strategie di rinforzo, ottimizzazione materica e requisiti biologici, mostrando come la manifattura additiva possa supportare la realizzazione di componenti di involucro a basso impatto ambientale, modulari e potenzialmente scalabili. Sotto questo profilo il caso studio della Scuola Carducci risulta particolarmente significativo perché esplicita il passaggio dalla sperimentazione di laboratorio alla validazione in situ, evidenziando al contempo come la trasferibilità del prototipo dipenda non solo dalla sua efficacia formale o ambientale ma anche dalla compatibilità con logiche di posa, manutenzione, sicurezza e gestione nel tempo.

Le prestazioni attese del sistema vanno oltre la mera mitigazione termoigrometrica, includendo il supporto alla biodiversità urbana, alla connettività ecologica e alla qualità dello spazio educativo. Il monitoraggio previsto dopo l'installazione del prototipo consentirà infatti di verificare comparativamente gli effetti del sistema sulle condizioni microclimatiche locali e di valutare parallelamente parametri ecologici quali la sopravvivenza delle specie vegetali e la ricchezza tassonomica degli invertebrati. In questo senso gli spazi ricreativi scolastici possono essere considerati dispositivi sperimentali privilegiati, in cui rigenerazione ecologica, apprendimento ambientale e validazione tecnica operano simultaneamente.

Un ulteriore elemento di rilievo del lavoro svolto è l'integrazione della prospettiva del ciclo di vita sin dalla fase prototipale: l'adozione di strategie progettuali orientate allo smontaggio, la modularità del sistema, la sostituzione selettiva dei componenti, il riuso diretto dei moduli e il riciclo dell'argilla a fine vita configurano il sistema in una logica coerente con i principi della circolarità. Ciò consente di affrontare in modo preliminare una delle criticità più rilevanti delle soluzioni tecnologiche basate sulla natura, ossia il rischio di trasferire gli impatti ambientali dalla fase d'uso a quella di produzione e dismissione.

Nel complesso Urban Bloomers dimostra come la ricerca sperimentale possa evolvere in soluzioni rigenerative scalabili, contribuendo congiuntamente agli SDG 4 (Istruzione di qualità), 9 (Industria, innovazione e infrastrutture), 11 (Città e comunità sostenibili), 12 (Consumo e produzione responsabili), 13 (Lotta contro il cambiamento climatico) e 15 (Vita sulla Terra), posizionando l'involucro edilizio come catalizzatore della rigenerazione urbana e della transizione ecologica. La rete inter- e transdisciplinare attivata dal progetto, comprendente Università, Enti territoriali, imprese e organizzazioni di citizen science, costituisce inoltre un modello di governance replicabile, capace di rafforzare le condizioni di trasferibilità della ricerca.

Permangono tuttavia alcuni limiti che coincidono anche con i principali sviluppi futuri; l'effettiva maturazione del sistema dipenderà dagli esiti del monitoraggio in situ, dalla verifica della durabilità dei moduli in condizioni reali di esposizione, dall'approfondimento delle valutazioni LCA e dei costi, nonché dalla possibilità di testare il sistema in altri

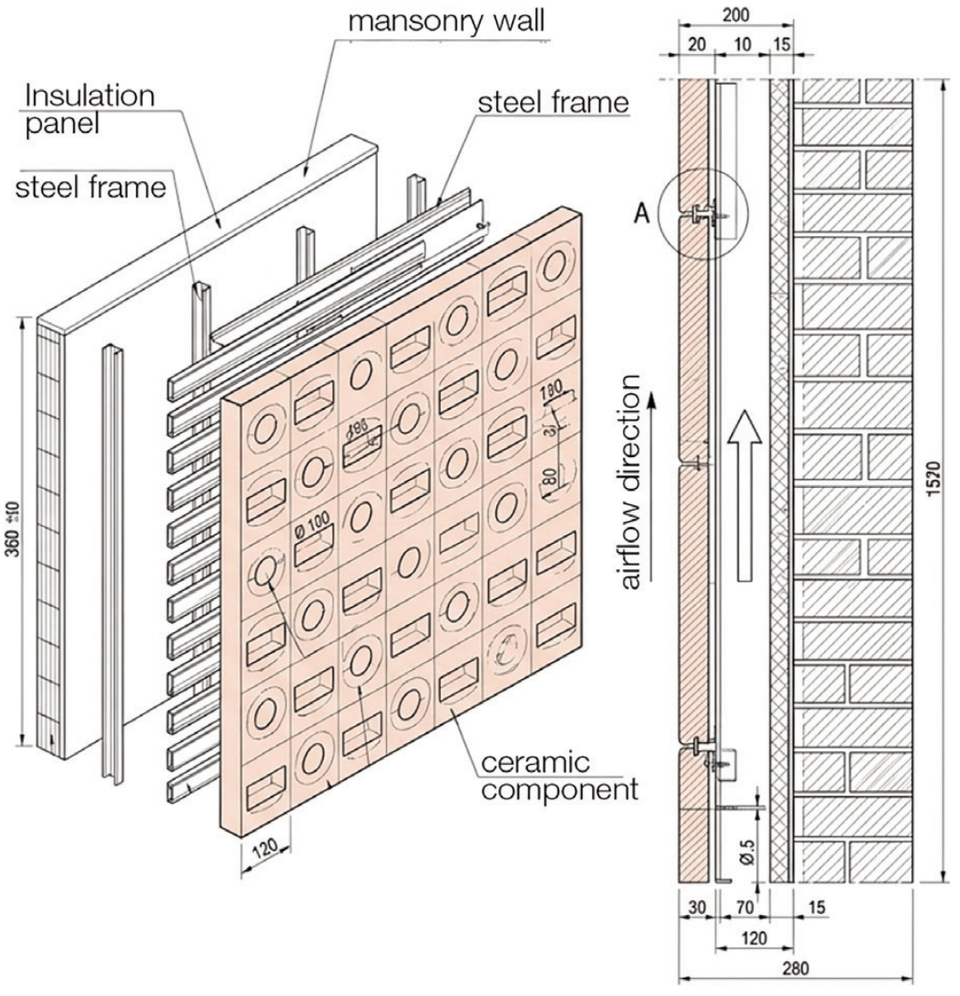


Fig. 5 | Diagram of the fixing system and substructure of The Dome Wall façade system (credit: the Authors, 2026).

contesti scolastici e urbani del bacino mediterraneo. Solo attraverso tali verifiche sarà possibile confermare pienamente il passaggio dalla fase prototipale all'applicazione urbana e consolidare il quadro prestazionale, ecologico e costruttivo dei prototipi Urban Bloomers.

Within the ecological transition, the development of façade systems inspired by the principles of biophilic design, made with low-environmental-impact materials and conceived to host plant and animal species, represents one of the most significant challenges for the construction sector. Numerous studies show that the architectural envelope can play a strategic role in supporting the resilience of contemporary cities, which are increasingly exposed to densification processes, biodiversity loss, and altered microclimatic conditions, with significant consequences for environmental quality and human health (Longato et alii, 2023; Wei et alii, 2023; Coccia, Cipolletti and Corvaro, 2024).

In this scenario, there is a need to devise new envelope systems conceived as adaptive technological infrastructures, capable of mediating energy flows between the built environment and the urban ecosystem and of contributing to the regulation of indoor and outdoor comfort, climate mitigation, and the ecological upgrading of urban space in both new-build interventions and deep retrofit processes (Ascione et alii, 2020; Riley, 2017). This perspective entails moving beyond a purely performance-based conception of the envelope towards a broader interpretation in which the building component, biological support, and ecosystem services jointly contribute to the definition of multi-performing devices.

This development is significantly supported by innovations associated with the paradigms of Industry 5.0, enabling technologies, and, in particular, computational design and additive manufacturing processes, which allow advanced control of geometry, material composition, and the modes of integration between passive components, vegetation, and support systems (European Commission, 2024; Lolli et alii, 2023; Camacho et alii, 2018; El-Sayegh, Romdhane and Manjikian, 2020; Gasparini, 2023). Within this framework, digital fabrication applied to natural materials, and to clay in particular, opens up new possibilities for the production of bio-informed, modular, and adaptable components, capable of combining customisation, waste reduction, producibility, and ecological integration.

This technological and environmental convergence paves the way for the development of technological Nature-based Solutions (Tech-NbS), understood as hybrid systems in which biological, physical, and, in the most advanced cases, sensor-based components cooperate to optimise environmental performance, resource management, and ecosystem services (Snep et alii, 2020; Mahmoud et alii, 2024; Kõiv et alii, 2024). At the building scale, such solutions find one of their most promising applications in Living Wall Systems (LWS), whose evolution towards biodiversity-oriented configurations makes it possible to rethink the envelope as an active ecological interface, capable of supporting stress-resilient plant species, improving the local microclimate, and contributing to the regeneration of vertical surfaces in consolidated urban contexts. Urban Bloomers is positioned within this framework as a research project developed through inter- and transdisciplinary collaboration between architects, biologists, agronomists, companies, and institutional actors. The project takes school recreational spaces as experimental devices for urban regeneration and investigates the potential of Tech-NbS LWS, 3D printed in clay and co-designed with the community.

The article presents the methodological framework of the research, the design criteria emerging from the state-of-the-art analysis, and the first outcomes of the experimentation carried out on a prototype biophilic façade (The Dome Wall) intended for integration into a lower secondary school in the Municipality of Florence. More specifically, the paper shows how the integration of participatory design, additive manufacturing, biological validation, and in situ application can support the development of biodiversity-oriented envelope components for urban regeneration at full scale.

With this ambition, the contribution is structured around three specific objectives: 1) to define a replicable methodological framework for designing biophilic envelope components through additive manufacturing processes and participatory approaches; 2) to verify the technical, constructional, and ecological feasibility of 3D-printed clay modules as active ecological interfaces at real scale; 3) to identify the system's conditions of transferability to other school and urban contexts in the Mediterranean basin.

Following a critical review of the state of the art aimed at constructing a synoptic framework of the evolution of Vertical Greening Systems towards Tech-NbS configurations, the article presents the methodological approach adopted. This approach is based on the integration of Citizen Science and Public Engagement strategies, intended to involve end users in the discussion and sharing of design and environmental choices throughout all phases of the design process, leading to the definition of the characteristics of The Dome façade system (Basnou et alii, 2020; Dallere and Tempestini, 2024). The discussion then outlines the workflow that led to the production of the prototype, developed through computational modelling and additive manufacturing processes and intended for installation at the Carducci School.

Finally, since the research is still in progress, after a brief discussion of the performance indicators identified to measure the environmental and ecological results through a monitoring phase that will begin in the coming months, the paper concludes with a critical discussion of the limits and potential of the work carried out, highlighting end-of-life scenarios and prospects for replicability.

The recognition received by Urban Bloomers, selected as an example of excellence and innovation within the New European Bauhaus Festival 2026, attests to its scientific relevance in the international debate. In particular, the project aims to: 1) address a gap identified in the literature on vegetated façade systems, where the transition from experimental artefacts to components validated at real scale remains limited (Riley, 2017; Ascione et alii, 2020; Irga et alii, 2023); 2) define original design frameworks for the development of bio-informed Tech-NbS (Snep et alii, 2020; Mahmoud et alii, 2024), producible through additive manufacturing processes using natural materials (Gyawali et alii, 2024; Aronne et alii, 2026); 3) contribute to raising awareness of environmental issues and STEM disciplines (science, technology, engineering, and mathematics) among younger generations through participation and co-design actions (Tiago, Evaristo and Pinto, 2024; O'Donnell et alii, 2025; Berretta, Desideri and Staltari, 2024).

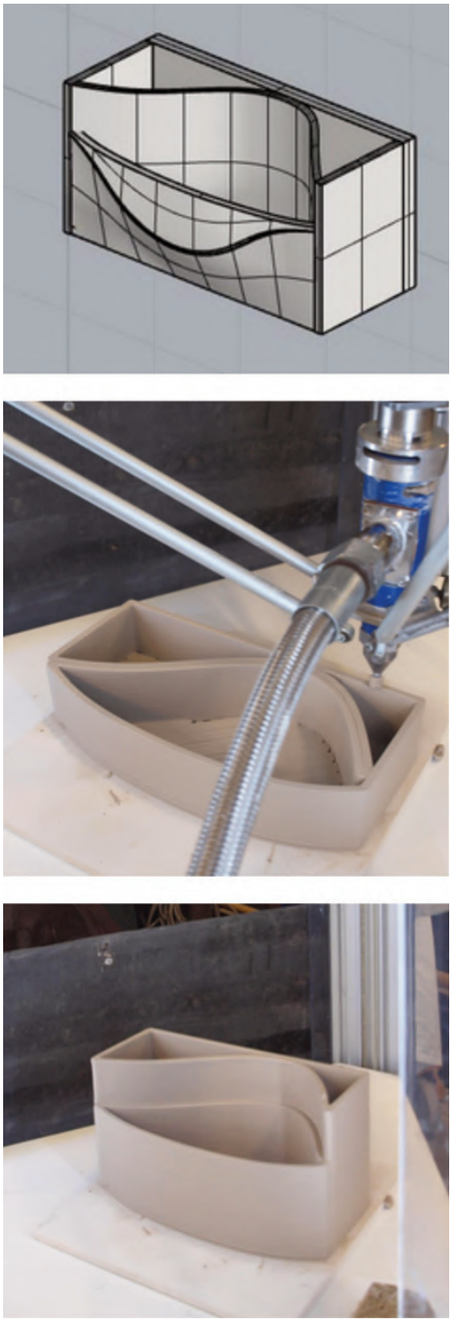


Fig. 6 | From digital model to prototyping: parametric modelling phase and additive production of a sub-component of The Dome Wall system through the Liquid Deposition Modelling process (credit: the Authors, 2026).

Urban Bloomers research | Urban Bloomers – Blooming in the City – Education and Co-design to Transform the City into a Resilient and Biodiverse Ecosystem, funded under the UniFI Extra 2025 – Public Engagement call of the University of Florence, was developed through a collaboration in-



Fig. 7 | Photomontage of The Dome Wall system on the Carducci Middle School terrace, simulating the integration of the device into the school context and its visual relationship with the Florentine urban landscape (credit: the Authors, 2026).

volving the Departments of Architecture (DIDA), Biology (BIO), and Agriculture, Food, Environment and Forestry (DAGRI), the Green Office of the University of Florence, the Region of Tuscany, the Municipality of Florence, two companies active in the additive manufacturing sector (Kentstrapper and r3direct), and two national organisations with consolidated experience in citizen science practices (Citizen Science Italia and the Italian Academy of Forest Sciences).

In line with the objectives of the call, the research prioritised the activation of forms of community participation capable of producing social, cultural, and educational impacts on the territory. From this perspective, the project oriented its activities towards the involvement of young citizens, particularly adolescents aged 10-13, in processes of urban space regeneration, taking the school not only as a place of education but also as a hub for sustainability, innovation, and environmental experimentation. The project identified two lower secondary schools in the Municipality of Florence as case studies – the Carducci Middle School in District 1 and the Manzoni Middle School in District 5 – whose external environments were used to develop two Vertical Greening Systems (VGS) produced through 3D printing processes. The school recreational space was therefore interpreted as an urban micro-laboratory in which to test the possibility of integrating technological innovation, participatory design, biodiversity, and environmental quality within a single functional and educational device.

Operationally, Urban Bloomers was structured into three complementary moments: a) a knowledge-building and dissemination phase, aimed at transferring basic knowledge on the regeneration of public space, urban green infrastructure, natural and recycled materials, and innovative technologies for the envelope; b) an application phase, focused on co-design activities, prototyping, and dialogue with technical and institutional partners; c) a final restitution and dissemination phase, dedicated to the public sharing of results, the prototypes developed, and the project's transfer prospects.

Urban Bloomers therefore tested an applied research methodology for transferring knowledge in sustainable and bio-inclusive design beyond the academic context, enhancing the role of schools as learning ecosystems and as spaces to be upgraded according to the principles of biophilic design and urban green infrastructure. The results achieved show the project's capacity to generate an impact that extends beyond the experimental dimension (in line with SDG 11, which aims to make cities and human settlements inclusive, safe, resilient, and sustainable): the activities carried out involved students, institutional actors, companies, and researchers in a shared process that laid the foundations for the subsequent development of modular, scalable, and contextually adaptable biophilic façade systems (Valente et alii, 2024).

3D-printed Tech-NbS | In the initial phase of the Urban Bloomers project, a knowledge-building study was conducted to reconstruct the evolution of traditional green wall systems, historically conceived as predominantly decorative vegetated apparatuses, towards bio-inclusive and multi-performing façade components capable of generating environmental, ecological, and social benefits. The preliminary state-of-the-art analysis showed that Vertical Greening Systems (VGS) can be traced to two main categories: green façades and Living Wall Systems.

Green façades, developed as relatively simple, technically and economically accessible solutions, use trellises, meshes or cable structures to support the growth of climbing plants, whose root systems are located either in the ground or in large planters. These systems are mainly used to enhance the visual quality of new or existing wall surfaces, although their hygrothermal benefits and microclimatic effects, while documented, are generally limited (Perini and Rosasco, 2013; Radic, Brkovic Dodig and Auer, 2019; Irga et alii, 2023; Radujkovic, Versele, and Breesch, 2024).

Living Wall Systems (LWS), conceived as vertical Tech-NbS, are made of modular panels that integrate substrate and vegetation and can be installed as an external finish to opaque vertical envelope elements. In addition to affecting the architectural image of the building, these systems contribute to the improvement of thermal performance and indoor and outdoor comfort, through the role played by plants in reducing the external surface temperatures of the wall assembly by activating evapotranspirative cooling processes, as well as in improving outdoor air quality. More complex and costly than green façades, LWS incorporate the growing substrate directly into the wall and adopt a modular configuration. Together with localised irrigation systems, this configuration enables pre-cultivation in nurseries before installation, selective replacement of modules during maintenance, and the use of a wider range of plant species. It can also support the creation of urban microhabitats and contribute to ecological connectivity (Qiao, 2025; Nasr et alii, 2024; Radujkovic, Versele and Breesch, 2024; Lunt et alii, 2025).

The case studies analysed showed that, for this latter category, the use of low-environmental-impact and high-albedo materials, combined with innovative technologies such as 3D printing, enables the production of bio-inspired modules characterised by organic geometries, differentiated roughness, and adaptive configurations. Additive manufacturing assumes a strategic role in this respect, as it enables biological and geometric requirements to be translated simultaneously into technological façade components, reducing the constructional and maintenance complexity of traditional systems and enabling, through parametric processes, the replicability of the system, its adaptability to different surfaces and climatic contexts, and the production of customised variants at costs comparable with serial production (Camacho et alii, 2018; El-Sayegh, Romdhane and Manjikian, 2020; Turrin, de Ruiter and Tenpierik, 2021).

On the basis of this preliminary survey, LWS produced through 3D printing processes were selected as the operational field of reference for Urban Bloomers, since they represent the category in which the typical performance of vertical envelope components, biological supports, and ecosystem services converge in the creation of a single multi-performing device, capable of operating as an active ecological interface at both architectural and micro-urban scales (Santi et alii, 2020; Bologna and Hasanaj, 2023; Ayad et alii, 2025).

Starting from this premise, the analysis moved to the detailed study of LWS case studies produced over the last decade, with the aim of understanding how the manufacturing process, geometric configuration, type of vegetation, and support systems have been configured to achieve high environmental and ecological performance

(Tab. 1). The selected examples were the subject of an in-depth investigation carried out through interviews and direct contacts with the designers and companies involved, who were asked to provide the information needed to complete survey sheets divided into the following exploratory sections:
1) System overview, with a concise description of the case study, including the installation site, the reference research project, the funding source, and the development team;
2) Technological data of sub-components, concerning the description of the system's constructional and material characteristics (material family, composition and origin, circularity potential, design approach, hygrothermal performance of the envelope, geometric dimensions, surface treatments, fixing systems), and the level of technological maturity;
3) Additive manufacturing process adopted, containing specifications on the production phase, from design (parametric, algorithmic, generative, CAD) to the printing phase (printing family, type of printer used), through to post-processing operations;
4) Building services equipment, concerning the presence and type of irrigation and monitoring systems installed;
5) Integrated vegetation, concerning the botanical and design choices for the implementation of vegetated systems and, therefore, species, substrate, planting geometry, methodology, and plant life stage at the time of installation.

The analytical comparison of the 15 selected case studies made it possible to group the applications into three clusters according to their design purpose, level of technological maturity, and capacity to integrate environmental performance, vegetation, and additive manufacturing processes. A first group of applications – CELLA (Miller, 2014), BANYAN Eco Wall (Delfosse, 2025; Chahin et alii, 2022), Nature Clouds (Thompson, 2020), and Nadarra[1] – was conceived primarily as artistic installations or design objects, privileging formal experimentation and visual impact over the achievement of quantifiable environmental performance. These experiences mainly involve the use of hot-extruded plastic polymers and cold-extruded sandy and earthen mixtures, materials particularly suitable for producing complex forms at a small scale.

A second group of experiments – Cyber Green Voltaics[2], NEST[3], Green Klinkers (Wolf, Bauer and Knaack, 2024), Brick by Bit[4], and FloraVoltaica[5] – includes systems developed within research projects that employ parametric and algorithmic modelling, exploring the potential use of clay-based or photocatalytic materials in the definition of components capable of hosting vegetation and, in the most advanced cases, integrating monitoring and energy production systems. Although these experiments have produced promising results from an energy and environmental perspective, they remain at a medium-to-low level of technological maturity, generally between TRL 3 and TRL 4. They are mainly limited to component prototyping and laboratory testing, without consolidated validation in full-scale building applications.

A third group of products – Cabin of 3D-printed Curiosities[6], Co-Mida[7], Aeroponic Aggregate[8], Vertical Food Farm (Gyawali et alii, 2024), Biomic Wall developed by Contala (Khan, 2023), Voronoi Wall[9], and Studio RAP's Green Wall[10] – finally shows how experimental research is evolving towards the production of modular, scalable technological systems with potential architectural integration. The technological maturity of these case studies ranges from intermediate to advanced levels (approximately between TRL 5-7). In earth-based cases (and therefore excluding the Voronoi Wall), the optimisation of material mixtures plays a central role in the additive process: clays, natural fibres, and recycled aggregates are used to balance printability, structural stability, hygroscopic behaviour, and physico-chemical compatibility with the vital requirements of the integrated plant species.

The comparative analysis of all the selected case studies made it possible to identify five design directions transferable to the Urban Bloomers façade systems project and attributable to the following criteria: 1) modularity and scalability; 2) use of low-environmental-impact materials; 3) correlation between geometric configuration and type of integrated vegetation; 4) minimisation of dependence on active irrigation systems; 5) orientation towards in situ validation and transferability.

The choice of clay for producing The Dome façade prototype also derives from the analysis of the performance observed in the pilot projects, in which this material proved particularly suitable for experimenting with additive manufacturing processes and for supporting the integrated plant species, helping to reduce dependence on active irrigation systems (Crawford et alii, 2022; Madrid et alii, 2023; Aronne et alii, 2026).

Urban Bloomers participatory approach | During the implementation phase of Urban Bloomers, it proved essential to develop an original participatory model, capable of integrating academic and industrial expertise with situated user knowledge in the definition of design parameters applicable to the regeneration of school micro-environments and aimed at defining, together with end users, the environmental, biological, and constructional criteria underpinning the development of Tech-NbS LWS to be produced in the application phase of the research. Pursuing this objective, the design phase followed the research-by-design model and was conceived as a knowledge-production tool structured into three complementary operational moments (Fig. 1): the exploratory phase, during which BioBlitz events were organised as collaborative citizen science activities involving experts, researchers, volunteers, and citizens in the observation, identification, and mapping of spontaneous plant species present in the districts where the case-study schools are located (Tiago, Evaristo and Pinto, 2024); the creative phase, articulated through co-design workshops aimed at translating the knowledge outcomes emerging from the BioBlitz activities into shared design criteria through guided discussion, needs mapping, species selection, and the construction of use scenarios (Basnou et alii, 2020; O'Donnell et alii, 2025; Dallere and Tempestini, 2024); and the operational phase, aimed at promoting – through the activation of a dedicated university thematic seminar – iterative cycles of parametric modelling, fabrication testing, and biological validation, during which students, researchers, and entrepreneurs worked jointly on the detailed development of the Urban Bloomers modules. Taken together, these activities produced three main outcomes: a georeferenced floristic repertoire of the spontaneous plant species present in the districts of the schools involved; a set of shared design requirements; and morphological and geometric configurations of the envelope subcomponents conceived to balance fabrication constraints, architectural requirements, and biological performance.

The co-design process adopted (Fig. 2), in accordance with SDG 4 (which aims to ensure inclusive and equitable quality education and promote lifelong learning opportunities for all), made it possible to achieve relevant results in terms of: a) cognitive and educational outcomes, through the active involvement of students and citizens in biodiversity mapping, species selection, and the design of façade components; b) contextual and ecological outcomes, through the integration of situated knowledge in the design phase, useful for the geometric definition of the modules and for the selection of plant species that could be integrated; this knowledge concerned the identification and use of spatial configurations, indicators of thermal discomfort, and microclimatic specificities of school recreational spaces; c) operational and systemic outcomes, through the early identification, during the design phase, of maintenance constraints, irrigation strategies, accessibility requirements, and critical issues related to the durability of the technological artefact.

The results achieved through the participatory approach enabled iterative exchange between expert and situated knowledge, producing design coherence verified in the real application context of the subsequent prototyping phase.

The Dome Wall LWS for Carducci Middle School | Among the prototypes developed within the research, the Dome Wall system can be considered the most significant case study for verifying the transition from design experimentation to in situ application. It is a technological green wall solution designed for installation in the recreational space of the roof terrace of the Giosuè Carducci lower secondary school (Fig. 3). The building, located in the historic centre of Florence, is subject to landscape protection and is embedded in an urban context of high historical and monumental value, characterised by visual proximity to numerous architectural landmarks, including the iconic Dome of Santa Maria del Fiore, visible from the space selected for the prototype installation.

With the aim of respecting the landscape and formal constraints of this particular context without adopting a mimetic logic, the design of the façade component was developed by reinterpreting the geometric motifs of Brunelleschi's drum – oculi, frames, and the relationships between circle, rectangle, and square – and translating them into a parametric language capable of combining figurative recognisability, manufacturability, and bioreceptivity.

In line with the design indicators identified during the state-of-the-art analysis and with SDGs 13 and 15 (which aim respectively to combat climate change and protect terrestrial ecosystems), the system was developed as a Tech-NbS LWS to support the growth of plant species resilient to urban climate stresses, particularly the high surface temperatures and prolonged drought typical of the Mediterranean climate. The design strategy understood the façade as an active ecological in-

terface, capable of integrating architectural aspects, microclimatic conditions, and biological performance within a replicable modular system. The project was developed according to a logic in which geometric configuration, material behaviour, plant species, assembly, and maintenance were considered interdependent parameters.

The digital workflow adopted involved the geometric definition of the modules in Rhinoceros 8 and their optimisation for 3D printing in Grasshopper, so as to control with millimetre-level precision the shape of the cavities, wall thicknesses, internal reinforcements, component interlocking, and the subsequent extrusion path. In parallel, renderings and photomontages enabled ex ante assessment of the components' impact on the school elevation and the landscape, verifying the compatibility between technical innovation and context, in accordance with SDG 9, which aims to build resilient infrastructure, promote inclusive and sustainable industrialisation, and foster technological innovation.

From the technical point of view, the system was conceived as a limited set of modular families, parametrically adaptable to different façade surfaces. For the Carducci School, two types of clay modules were designed (Fig. 4), measuring 30 × 30 × 15 cm, both based on an assembly logic of printable sub-components to balance dimensional precision, structural stability, ease of installation, and integration of the growing substrate.

The first module, with a central circular cavity, reinterprets the oculi of the Dome's drum and is intended to host bushy species with limited aboveground biomass and compact root systems, such as 'Rosmarinus officinalis', 'Thymus vulgaris', 'Lavandula officinalis', 'Erica multiflora', and 'Helichrysum italicum'. The second module, characterised by an elongated horizontal cavity, was designed to enable the integration of prostrate or trailing plant species, such as 'Portulaca oleracea', 'Cymbalaria muralis', and 'Rosmarinus officinalis prostratus', favouring continuity of vegetative cover and increased surface shading.

In both cases, particular attention was paid to the definition of the section geometries and to the arrangement of stiffening ribs, configured to respond to two sets of interdependent structural requirements: preventing collapse during printing and ensuring the rigidity of the module for its attachment to the metal substructure during installation. In addition, the arrangement of the ribs established a functional relationship with biological parameters: as separating elements, they define the extent and configuration of the internal hollow volumes intended to integrate the substrate, thereby affecting rootable depth, moisture distribution, and drainage conditions.

The technical and constructional verification of the system showed that the geometric choices also directly influence the definition of the support substructure: the analysis of the fixing systems, conducted by using a standard aluminium mullion-and-transom system as a reference typical of ventilated terracotta façades, showed that the reduced height of some module sub-components leads to an excessive concentration of horizontal rails, making it necessary to develop an alternative substructure (Fig. 5).

Full-scale prototyping was carried out at Ceramica Blu, with support from the partner r3direct, using the WASP 40100 printer for the Liquid Deposition Modelling of a mixture of white clay and water. In this phase, the three-dimensional models were converted into G-code through parametric slicing, enabling control of the extrusion trajectory and the preliminary verification of critical issues related to deposition continuity, overhangs, drying times, and material shrinkage. Therefore, the printing phase constituted not only a production moment, but also a genuine experimental verification of the additive manufacturing process, confirming that parameters such as printability, green-state stability, drying behaviour, and post-firing tolerances must be controlled from the earliest modelling stages (Fig. 6).

Since the prototype is intended for installation in a real school context, maintenance and safety were considered primary design requirements. Moreover, the system was configured for low-intensity maintenance, based on emergency irrigation when critical moisture thresholds are reached, scheduled inspections, seasonal verification of anchors, possible substrate replenishment, and removal of invasive species. These measures are accompanied by safety provisions concerning system durability, prevention of the risk of falling components, material compatibility with the wall support, and the controllability of maintenance operations.

Expected performance and monitoring protocol | The Dome Wall prototype is intended to be installed in July 2026 in the recreational space of the Carducci School terrace (Fig. 7), initiating an in situ validation phase based on a comparative monitoring plan between pre- and post-installation conditions, also taking as reference a portion of the existing façade not subject to upgrading. To assess system performance, a Monitoring Protocol (Tab. 2) has been developed, structured by thematic areas, indicators, instruments / methods, acquisition frequencies, pre- and post-installation assessment procedures, and expected outcomes.

With regard to microclimatic aspects, monitoring focuses on the indicators of air temperature, surface temperature, and relative humidity, recorded by thermal sensors to be installed near the wall, infrared thermographic sensors, and combined thermo-hygrometric sensors. The acquisition frequency is defined as a comparative campaign, structured into a pre-installation assessment phase (survey of baseline thermo-hygrometric conditions and preliminary microclimatic analyses of the space under intervention) and a post-installation assessment phase (monitoring close to the wall and in adjacent areas). In line with the expected outcomes set out in the protocol, these measurements are intended to verify reductions in air and surface temperatures and an increase in local relative humidity, with effects on outdoor comfort parameters (Cui et alii, 2022; De Jesus et alii, 2017).

In parallel, following the protocol's multi-indicator approach, an ecological assessment campaign will be launched to record plant survival rates, percentage cover, and flowering phenology. Faunal biodiversity will also be monitored in terms of abundance and taxonomic richness of invertebrates, through standardised sampling protocols (Montgomery et alii, 2021), consistent with the multi-indicator approach adopted (Valente et alii, 2024). With reference to Life Cycle Assessment (LCA) aspects, Urban Bloomers integrates a life-cycle perspective from the design phase onwards, in line with methodological indications for the assessment of the environmental performance of green façade systems (El-Zoklah and Refaat, 2021). The circularity of the system is pursued through the adoption of design strategies oriented towards dry assembly to ensure the disassembly of the components and all their sub-parts.

In accordance with SDG 12 (which aims to ensure sustainable consumption and production patterns), the end-of-life scenarios include, in descending order within the hierarchy of circularity, the closed-loop reintegration of unfired clay waste as raw material in subsequent printing cycles (Madrid et alii, 2023), the reuse of modules in other application contexts, and the possible crushing of damaged elements to produce inert aggregate that can be used as a recycled material fraction in new ceramic mixtures (Velasco et alii, 2014).

At present, the system is transitioning from prototyping to full-scale validation; subsequent advances in maturity will depend on the outcomes of in situ monitoring, assessed against the indicators and expected results defined in the monitoring protocol, on verification of system durability, and on the availability of further resources for possible pre-commercial replication processes.

Conclusions | Urban Bloomers shows how the development of 3D-printed clay Tech-NbS LWS can constitute a credible strategy for the bio-inclusive regeneration of school spaces, provided that material innovation, parametric design, biological validation, and co-design are integrated within a single methodologically structured process. Within this framework, the main contribution of the work lies not only in the prototype developed, but above all in the definition of a replicable framework for transforming building surfaces into ecological, educational, and climate-responsive micro-infrastructures, applicable in consolidated urban contexts and potentially transferable to the Mediterranean area.

From a scientific point of view, the research advances the debate on vegetated façade systems in at least three directions: first, it proposes an integrated approach that overcomes the separation between building component and biological support, interpreting the envelope as an active ecological interface capable of contributing simultaneously to microclimatic mitigation, biodiversity support, and the qualification of educational space; second, it defines a working method in which the participatory approach does not have an accessory function but contributes directly to the definition of the system's environmental, biological, figurative, and maintenance requirements; third, it verifies the potential of parametric design as an approach for translating heterogeneous requirements –geometric, constructional, ecological, and material – into modular, adaptable components oriented towards technology transfer.

From this perspective, the development of the two modules of The Dome Wall façade system confirms the potential of additive manufacturing to connect architectural language, ecological functionality, and fabrication constraints. The computational and production workflow developed enabled coherence between geometry, reinforcement strategies, material optimisation, and biological requirements, demonstrating how additive manufacturing can support the production of low-

Thematic area	Indicators	Instrument / Method	Frequency	Pre-installation assessment	Post-installation assessment	Expected outcomes
Microclimate	Air temperature	Thermal sensors in proximity to the wall	Comparative pre/post campaign	Baseline thermal characterisation of the intervention zone (Carducci school terrace)	Monitoring in proximity to the wall and in the courtyard affected by the intervention	Reduction of air temperature near the vegetated wall compared to baseline conditions
	Surface temperature	Infrared thermographic camera (employed in the preliminary phase)	Comparative pre/post campaign	Preliminary microclimatic analysis of the terrace by IR thermography	Comparative survey of surface temperatures of the building envelope before and after LWS installation	Reduction of envelope surface temperatures through shading and evapotranspiration of integrated plant species
	Relative humidity	Hygrometers / combined T-RH sensors	Comparative pre/post campaign	Baseline survey of hygrothermal conditions at the installation site	Monitoring of relative humidity in proximity to the wall	Increase in local relative humidity due to evapotranspiration of species integrated in the system
Outdoor comfort	Outdoor comfort parameters	Indices derived from recorded microclimatic parameters (T air, surface T, RH)	Comparative pre/post campaign	Baseline survey of outdoor comfort conditions in the Carducci school courtyard	Assessment of the impact of microclimatic conditions on outdoor comfort parameters in the courtyard	Improvement of outdoor comfort conditions in the courtyard affected by the intervention
Plant ecology	Plant survival rate	Scheduled visual inspections; field surveys	Seasonal inspections (low-intensity maintenance regime)	Not applicable pre-installation	Periodic recording of the number of viable individuals per species in the LWS modules	High survival rates for selected species
	Vegetation cover percentage	Photographic and/or planimetric surveys; image analysis	Seasonal surveys (spring-summer-autumn)	Not applicable pre-installation	Measurement of the percentage of the system surface covered by living vegetation	Achievement of significant and stable vegetation cover over time, compatible with the prostrate/trailing and shrubby species planned
	Flowering phenology	Direct observation; periodic photographic surveys	Seasonal surveys (spring-summer-autumn)	Not applicable pre-installation	Recording of flowering periods and intensity of integrated species	Confirmation of species adaptation to the site microclimate and their ability to complete phenological cycles
Fauna biodiversity	Invertebrate abundance	Standardised sampling protocols	Comparative pre/post campaign; periodic sampling	Baseline survey of invertebrate abundance in the intervention zone (pre-installation)	Count of invertebrate individuals associated with the LWS system and courtyard	Increase in invertebrate abundance as a result of the introduction of vegetated habitat and availability of floral resources
	Invertebrate taxonomic richness	Standardised sampling protocols	Comparative pre/post campaign; periodic sampling	Baseline survey of invertebrate taxonomic richness in the intervention zone	Taxonomic identification of invertebrates sampled in the LWS system and courtyard	Increase in invertebrate taxonomic richness compared to baseline, confirming the ecological value of the biophilic system
LCA / Circularity	Life cycle environmental impacts	Life Cycle Assessment; life cycle perspective integrated from the prototype phase	Assessment integrated across design, prototyping, and monitoring phases	LCA integrated from the prototype phase to avoid shifting impacts from operational benefits to production burdens	Verification of the environmental impacts of the system during operation, maintenance and end-of-life	Demonstration of system circularity: selective module replacement, direct reuse, crushing as inert aggregate, recycling of unfired clay
	Modularity and component replaceability	Scheduled visual inspections; seasonal verification of mechanical anchoring	Scheduled inspections; seasonal verification	Not applicable pre-installation	Verification of the possibility of selective replacement of damaged modules without removing the entire system	Confirmation of modular replaceability as a design-for-disassembly strategy and reduction of maintenance impacts
Durability / Transferability	System durability	Visual inspections; seasonal verification of anchoring; compatibility check of materials with the masonry substrate	Scheduled inspections; seasonal verification of anchoring	Characterisation of the masonry substrate and verification of material compatibility before installation	Monitoring of the durability of 3D-printed clay modules under real exposure conditions (Mediterranean climate)	Verification of system durability and stability in a real school context; basis for pre-commercial replication
	Replicability in other Mediterranean contexts	Documented methodological framework; transferability assessment of the system	Assessment at the end of the in-situ validation phase	Not applicable pre-installation	Assessment of system transferability based on monitoring outcomes and durability verification	Definition of replicability conditions in other Mediterranean contexts, subject to availability of resources for pre-commercial replication

Tab. 2 | Comparative pre- and post-installation monitoring plan for The Dome Wall prototype (credit: the Authors, 2026).

impact, modular, and potentially scalable envelope components. In this respect, the Carducci School case study is particularly significant because it makes explicit the transition from laboratory experimentation to in situ validation, while also showing how the transferability of the prototype depends not only on its formal or environmental effectiveness, but also on its compatibility with installation, maintenance, safety, and long-term management logics.

The technological and environmental performance of the Dome Wall system extends beyond mere hygrothermal mitigation, encompassing support for urban biodiversity, ecological connectivity, and the quality of educational spaces. The planned post-installation monitoring of the prototype will allow a comparison of the façade system's effects on local microclimatic conditions and, in parallel, assessment of ecological parameters such as plant species survival and the taxonomic richness of invertebrates. In this sense, school recreational spaces can be considered privileged experimental devices in which ecological regeneration, environmental learning, and technical validation operate simultaneously.

A further significant aspect of the work carried out is the integration of the life-cycle perspective from the prototyping phase onwards. The adoption of design strategies oriented towards disassembly, system modularity, selective replacement of components, direct reuse of modules, and end-of-life recycling of clay configures the system according to a logic consistent with the principles of circularity; this makes it possible to address, at a preliminary level, one of the most relevant critical issues of technological Nature-based Solutions, namely the risk of transferring environmental impacts from the use phase to the production and end-of-life phases.

Overall, Urban Bloomers demonstrates how experimental research can evolve into scalable regenerative solutions, contributing jointly to SDGs 4 (Quality Education), 9 (Industry, Innovation and Infrastructure), 11 (Sustainable Cities and Communities), 12 (Responsible Consumption and Production), 13 (Climate Action), and 15 (Life on Land), positioning the building envelope as a catalyst for urban regeneration and the ecological transition. The inter- and transdisciplinary network activated by the project, which includes universities, territorial authorities, companies, and citizen science organisations, also constitutes a replicable governance model capable of strengthening the conditions for research transferability. Some limitations nevertheless remain, and they also coincide with the main future developments. The effective maturation of the technological system will depend on the outcomes of in situ monitoring, verification of the durability of the modules under real exposure conditions, further investigation of LCA and cost assessments, and the possibility of testing the system in other schools and urban contexts in the Mediterranean basin. Only through these verifications will it be possible to fully confirm the transition from the prototype phase to urban application and to consolidate the performance, ecological, and constructional framework of the Urban Bloomers envelope solutions.

Acknowledgements

The research is currently in progress and is in the transition phase from prototyping to in situ validation. The authors would like to express their gratitude to the research group involved in the Urban Bloomers project, affiliated with the Department of Architecture (DIDA), the Department of Biology (BIO), and the Department of Agriculture, Food, Environment and Forestry (DAGRI) of the University of Florence. Special thanks are due to the TAM Laboratory, the ABITA Research Centre, and the Green Office of the University of Florence, who supported the project through their knowledge, experience, and institutional collaboration.

The contributions of the partner companies r3direct, Kentstrapper, and Ceramica Blu, the institutional support of the Region of Tuscany and the Municipality of Florence (Districts 1 and 5), and Citizen Science Italia and the Italian Academy of Forest Sciences, for their expertise in participatory and ecological research, are gratefully acknowledged.

Special thanks are due to E. Martinelli and C. Marconi for the graphic elaboration of the design materials and to A. De Pascalis and C. Ceccarelli for their support during the co-design phase.

Both the Authors developed the contents of the paper in synergy; however, R. Romano (who coordinated the review of the contributions) may be attributed the introductory paragraph, 'Urban Bloomers research', 'Urban Bloomers participatory approach', and 'Conclusions', while E. Mazzoni (who was responsible for the general drafting of the contents) may be attributed the paragraphs '3D-printed Tech-NbS', 'The LWS The Dome Wall system for Carducci Middle School', and 'Expected performance and monitoring protocol'.

Notes

1) For more information on the Nadarra project, see the webpage: barrywark.com/nadarra [Accessed 11 April 2026].

2) For more information on CGV – Cyber Green Voltaics, see the webpage: [Online] Available at: iaac.net/projects/cgv-cyber-green-voltaics/ [Accessed 11 April 2026].

3) For more information on the Nest project, see the webpage: neweuropeanbauhaus.es/en/proyectos/nest/ [Accessed 11 April 2026].

4) For more information on the Brick by Bit project, see the webpage: parametric-architecture.com/brick-by-bit-redefines-clay-bricks-with-3d-printing/?srsltid=AfmBOooQpA0va8iUzyDYLKl8wR6t3cO_S67sNAFX9xsV53pW_IHQgou7 [Accessed 11 April 2026].

5) For more information on the FloraVoltaica project, see the webpage: iaac.net/projects/floravoltaica/ [Accessed 11 April 2026].

6) For more information on the Cabin of 3D-Printed Curiosities project, see the webpage: emergingobjects.com/project/cabin-of-3d-printed-curiosities/ [Accessed 11 April 2026].

7) For more information on the Co-Mida project, see the webpage: iaac.net/projects/co-mida/ [Accessed 11 April 2026].

8) For more information on Fo16 – Aeroponic Aggregates, see the webpage: op-aliicom/aeroponicaggregates [Accessed 11 April 2026].

9) For more information on the Voronoi Wall project, see the webpage: vertico.com/projects/voronoi-wall [Accessed 11 April 2026].

10) For more information, see the webpage: linkedin.com/posts/studio-rap_craftmanship-bespoke-elevatespace-activity-7351543904422248450-wTWE [Accessed 11 April 2026].

References

Aronne, M., Schwarzer-Fischer, E., Bertana, V., Mossotti, G., Scheithauer, U., Ferrero, S. and Scaltrito, L. (2026), "Exploring circularity in ceramic 3D printing – Possibilities and implementation", in *Open Ceramics*, vol. 25, article 100915, pp. 1-16. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.oceram.2026.100915 [Accessed 11 April 2026].

Ascione, F., De Masi, R. F., Mastellone, M., Ruggiero, S. and Vanoli, G. P. (2020), "Green Walls, a Critical Review – Knowledge gaps, design parameters, Thermal Performances and Multi-Criteria Design Approaches", in *Energies*, vol. 13, issue 9, article 2296, pp. 1-39. [Online] Available at: doi.org/10.3390/en13092296 [Accessed 11 April 2026].

Ayad, C. V. G., Khateeb, S. E., Said, N. G. and Elbardisy, W. M. (2025), "Optimization of 3D-printed modular living walls in hot arid regions", in *Ain Shams Engineering Journal*, vol. 16, issue 10, article 103601, pp. 1-14. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.asej.2025.103601 [Accessed 20 April 2026].

Basnou, C., Pino, J., Davies, C., Winkel, G. and De Vreese, R. (2020), "Co-design processes to address Nature-based Solutions and ecosystem services demands – The long and winding road towards inclusive urban planning", in *Frontiers in Sustainable Cities*, vol. 2, article 572556, pp. 1-4. [Online] Available at: doi.org/10.3389/frsc.2020.572556 [Accessed 11 April 2026].

Berretta, T., Desideri, F. and Staltari, M. (2024), "Il progetto dello spazio pubblico, tra complessità e crisi ecologica – Da sfida a opportunità per la rigenerazione urbana | Public space project, between complexity and ecological crisis – From challenge to opportunity for urban regeneration", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 16, pp. 74-87. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/1662024 [Accessed 11 April 2026].

Bologna, R. and Hasanaj, G. (2023), "Modelli evoluti per la costruzione di un catalogo NbS per la resilienza e la biodiversità | Advanced models for the construction of an NbS catalogue for resilience and biodiversity", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 13, pp. 179-190. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/13152023 [Accessed 11 April 2026].

Camacho, D. D., Clayton, P., O'Brien, W. J., Seepersad, C., Juenger, M., Ferron, R. and Salamone, S. (2018), "Applications of additive manufacturing in the construction industry – A forward-looking review", in *Automation in Construction*, vol. 89, pp. 110-119. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.autcon.2017.12.031 [Accessed 11 April 2026].

Chahin, S., Afify, A., Mohsen, H. and Youssef, M. (2022), "Role of 3D printed green walls in healing architecture", in *BAU Journal | Health and Wellbeing*, vol. 5, issue 1, article 1, pp. 1-19. [Online] Available at: doi.org/10.54729/srop3798 [Accessed 11 April 2026].

Coccia, L., Cipolletti, S. and Corvaro, G. (2024), "Green Room – Un dispositivo architettonico e urbano per l'efficientamento energetico e il comfort ambientale | Green Room – An architectural and urban device for energy efficiency and environmental comfort", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 15, pp. 238-251. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/15192024 [Accessed 11 April 2026].

Crawford, A., In-Na, P., Caldwell, G., Armstrong, R. and Bridgens, B. (2022), "Clay 3D printing as a bio-design research tool – Development of photosynthetic living building components", in *Architectural Science Review*, vol. 65, issue 3, pp. 185-195. [Online] Available at: doi.org/10.1080/00038628.2022.2058908 [Accessed 20 April 2026].

Cui, D., Zhang, Y., Li, X., Yuan, L., Mak, C. M. and Kwok, K. (2022), "Effects of different vertical façade greenery systems on pedestrian thermal comfort in deep street canyons", in *Urban Forestry & Urban Greening*, vol. 72, article 127582, pp. 1-13. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.ufug.2022.127582 [Accessed 20 April 2026].

Dallere, C. and Tempestini, M. (2024), "Il Centro di Formazione a Salez – Progettare la sostenibilità con interazioni semplici tra utenti e architettura | An Educational Centre in Salez – Designing sustainability through simple interactions between users and architecture", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 16, pp. 118-129. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/16102024 [Accessed 11 April 2026].

De Jesus, M. P., Lourenço, J. M., Arce, R. M., and Macias, M. (2017), "Green façades and in situ measurements of outdoor building thermal behaviour", in *Building and Environment*, vol. 119, pp. 11-19. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.03.041 [Accessed 20 April 2026].

Delfosse, F. (2025), "BANYAN Eco Wall – World's first 3D printed green wall", in *bigrep.com*, 27/08/2025. [Online] Available at: bigrep.com/posts/banyan-eco-wall/ [Accessed 11 April 2026].

El-Sayegh, S., Romdhane, L. and Manjikian, S. (2020), "A critical review of 3D printing in construction – Benefits, challenges and risks", in *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, vol. 20, issue 2, article 34, pp. 1-25. [Online] Available at: doi.org/10.1007/s43452-020-00038-w [Accessed 11 April 2026].

El-Zoklah, M. H., and Refaat, T. (2021), "How to measure the green façades environmental effectiveness? A proposal to green façade systems technical guide", in *International Journal of Sustainable Building Technology and Urban Development*, vol. 12, issue 2, pp. 154-169. [Online] Available at: doi.org/10.22712/susb.20210013 [Accessed 20 April 2026].

European Commission (2024), *ERA industrial technologies roadmap on human-centric research and innovation for the manufacturing sector*, Publications Office of the European Union, Luxembourg. [Online] Available at: data.europa.eu/doi/10.2777/0266 [Accessed 11 April 2026].

Gasparini, K. (2023), "Design litico e manifattura additiva – Un connubio possibile per l'economia circolare | Lithic design and additive manufacturing – A feasible partnership for the circular economy", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 14, pp. 316-325. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/14272023 [Accessed 11 April 2026].

Gyawali, B., Haghnazar, R., Akula, P., Alba, K. and Nasir, V. (2024), "A review on 3D printing with clay and sawdust / natural fibers – Printability, rheology, properties and applications", in *Results in Engineering*, vol. 24, article 103024, pp. 1-27. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.rineng.2024.103024 [Accessed 11 April 2026].

Irga, P. J., Torpy, F. R., Griffin, D. and Wilkinson, S. J. (2023), "Vertical Greening Systems – A Perspective on Existing Technologies and New Design Recommendation", in *Sustainability*, vol. 15, issue 7, article 6014, pp. 1-13. [Online] Available at: doi.org/10.3390/su15076014 [Accessed 11 April 2026].

Khan, R. (2023), "Biomic Wall fuses ceramic 3D printing & ecological design for self-regulating greening façade", in *Designboom*, 16/08/2023. [Online] Available at: designboom.com/architecture/biomic-wall-ceramic-3d-printing-ecological-design-self-regulating-greening-facade-university-of-innsbruck-08-16-2023/ [Accessed 11 April 2026].

Kõiv, K., Annus, I., Kändler, N., Truu, M., Kaur, K. and Suits, K. (2024), "Smart Nature-Based Solutions for Stormwater Management in Urban Areas – An Analysis of Pilot Cases", in *Engineering Proceedings*, vol. 69, issue 1, article 18, pp. 1-4. [Online] Available at: doi.org/10.3390/engproc2024069018 [Accessed 11 April 2026].

Lolli, F., Coruzzolo, A. M., Neto, P. G. T., Sellitto, M. A. and Gamberini, R. (2023), "Key enabling technologies and concepts for the Human-Centric Industrial Revolution", in *Human Factors and Wearable Technologies*, vol. 85, pp. 36-46. [Online] Available at: doi.org/10.54941/ahfe1003625 [Accessed 11 April 2026].

Longato, D., Cortinovis, C., Balzan, M. and Geneletti, D. (2023), "A method to prioritize and allocate nature-based solutions in urban areas based on ecosystem service demand", in *Landscape and Urban Planning*, vol. 235, article 104743, pp. 1-14. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.landurbplan.2023.104743 [Accessed 11 April 2026].

Lunt, P. H., Buckley, J., Mitchell, S., Thomas, G., Churella, E., and Murphy, T. R. (2025), "Biodiversity Performance of living wall systems in urban environments – A UK case study of plant selection and substrate Effects on Multi-Taxa Communities", in *Urban Science*, vol. 9, issue 12, article 519, pp. 1-19. [Online] Available at: doi.org/10.3390/urbansci9120519 [Accessed 20 April 2026].

Madrid, J. A., Ortega, G. S., Carabaño, J. G., Olsson, N. O. E. and Ríos, J. A. T. (2023), "3D claying – 3D printing and recycling clay", in *Crystals*, vol. 13, issue 3, article 375, pp. 1-20. [Online] Available at: doi.org/10.3390/cryst13030375 [Accessed 11 April 2026].

Mahmoud, I., Morello, E., Bisello, A. and Kolokotsa, D. (2024), "Embedding technologies for improving Nature-Based Solutions performance and fostering social inclusion in urban greening strategies – Augmented NBS for cities", in *Urban Forestry & Urban Greening*, vol. 93, article 128215, pp. 1-3. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.ufug.2024.128215 [Accessed 11 April 2026].

Miller, E. (2014), "CELLA by ecoid", in *contemporist.com*, 14/04/2014. [Online] Available at: contemporist.com/cella-by-ecoid/ [Accessed 11 April 2026].

Montgomery, G. A., Belitz, M. W., Guralnick, R. P. and Tingley, M. W. (2021), "Standards and Best Practices for Monitoring and Benchmarking Insects", in *Frontiers in Ecology and Evolution*, vol. 8, article 579193, pp. 1-18. [Online] Available at: doi.org/10.3389/fevo.2020.579193 [Accessed 20 April 2026].

Nasr, Y., Zakhem, H. E., Hamami, A. E. A., Bachawati, M. E. and Belarbi, R. (2024), "Comprehensive Assessment of the Impact of green roofs and walls on building energy Performance – A scientific review", in *Energies*, vol. 17, issue 20, article 5160, pp. 1-52. [Online] Available at: doi.org/10.3390/en17205160 [Accessed 11 April 2026].

O'Donnell, M., Collier, M., Pineda-Pinto, M., Cooper, C., Nulty, F. and Rodriguez Castañeda, N. (2025), "Redefining co-design for social-ecological research and practice – A systematic literature review", in *Environmental Science & Policy*, vol. 164, article 103998, pp. 1-14. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.envsci.2025.103998 [Accessed 11 April 2026].

Perini, K. and Rosasco, P. (2013), "Cost-benefit analysis for green façades and living wall systems", in *Building and Environment*, vol. 70, pp. 110-121. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.08.012 [Accessed 11 April 2026].

Qiao, L. (2025), "Study on the dynamic heat transfer role of vertical greening in building microclimate based on multi-objective coupling", in *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, vol. 17, issue 2, article 025101, pp. 1-8. [Online] Available at: doi.org/10.1063/5.0240874 [Accessed 11 April 2026].

Radić, M., Brković Dodig, M. and Auer, T. (2019), "Green Facades and Living Walls – A Review Establishing the Classification of Construction Types and Mapping the Benefits", in *Sustainability*, vol. 11, issue 17, article 4579, pp. 1-23. [Online] Available at: doi.org/10.3390/su11174579 [Accessed 11 April 2026].

Radujković, M., Versele, A. and Breesch, H. (2024), "Exploratory Analysis of a Novel Modular Green Wall's Impact on Indoor Temperature and Energy Consumption in Residential Buildings – A Case Study from Belgium", in *Energies*, vol. 17, issue 21, article 5267, pp. 1-25. [Online] Available at: doi.org/10.3390/en17215267 [Accessed 20 April 2026].

Riley, B. (2017), "The state of the art of living walls – Lessons learned", in *Building and Environment*, vol. 114, pp. 219-232. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.12.016 [Accessed 11 April 2026].

Santi, G., Bertolazzi, A., Leporelli, E., Turrini, U. and Croatto, G. (2020), "Green systems integrated to the building envelope – Strategies and technical solution for the Italian case", in *Sustainability*, vol. 12, issue 11, article 4615, pp. 1-18. [Online] Available at: doi.org/10.3390/su12114615 [Accessed 20 April 2026].

Snep, R. P. H., Voeten, J. G. W. F., Mol, G. and Van Hattum, T. (2020), "Nature Based Solutions for Urban Resilience – A Distinction Between No-Tech, Low-Tech and High-Tech Solutions", in *Frontiers in Environmental Science*, vol. 8, article 599060, pp. 1-9. [Online] Available at: doi.org/10.3389/fenvs.2020.599060 [Accessed 11 April 2026].

Thompson, D. (2020), "The 'Weight' is Over for Lightweight 3D-Printed Parts – Companies collaborate to create suspended 3D-printed garden structure", in *machinedesign.com*, 29/05/2020. [Online] Available at: machinedesign.com/3d-printing-cad/article/21132685/igus-inc-the-weight-is-over-for-lightweight-3d-printed-parts [Accessed 11 April 2026].

Tiago, P., Evaristo, I. and Pinto, B. (2024), "The role of BioBlitzes in citizen science – Insights from participants and experts", in *Frontiers in Environmental Science*, vol. 12, article 1347428, pp. 1-14. [Online] Available at: doi.org/10.3389/fenvs.2024.1347428 [Accessed 11 April 2026].

Turrin, M., de Ruiter, P. and Tenpierik, M. J. (2021), "Additive Manufacturing for Integral Design and Engineering", in Knaack, U., Tessmann, O., Wibranek, B., Rosendahl, P. and Borg Costanzi, C. (eds), *BE-AM 2021 – Symposium and Exhibition*, Darmstadt, pp. 104-119. [Online] Available at: be-am.de/wp-content/uploads/2024/11/BE-AM_Booklet_2021.pdf [Accessed 20 April 2026].

Valente, R., Mozingo, L. A., Bosco, R. and Giacobbe, S. (2024), "Gestione integrata delle risorse naturali in contesti urbani sostenibili | Integrated natural resource management in sustainable urban context", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 15, pp. 180-189. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/15142024 [Accessed 11 April 2026].

Velasco, P. M., Ortíz, M. M., Giró, M. M., and Velasco, L. M. (2014), "Fired clay bricks manufactured by adding wastes as sustainable construction material – A review", in *Construction and Building Materials*, vol. 63, pp. 97-107. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.03.045 [Accessed 20 April 2026].

Wei, R., Xu, C., Song, D., Tong, H. and Chen, Z. (2023), "Study on the Correlation Analysis between Urban Morphological Factors and Microclimate Based on Empirical Methods on a University Campus in a Hot-Summer – Cold-Winter Region", in *Buildings*, vol. 13, issue 8, article 1920, pp. 1-25. [Online] Available at: doi.org/10.3390/buildings13081920 [Accessed 11 April 2026].

Wolf, A., Bauer, S. and Knaack, U. (2024), "Green klinkers – A Strategy to Include Plants in Double-Shell Masonry", in Lowke, D., Freund, N., Böhler, D. and Herding, F. (eds), *Digital Concrete 2024 – Supplementary Proceedings – Fourth RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication, Munich, Germany, September 4-6, 2024*, Technische Universität Braunschweig, Braunschweig, pp. 1-8. [Online] Available at: doi.org/10.24355/dbbs.084-202408191008-0 [Accessed 11 April 2026].

ARCHITECTURE
Research & Experimentation

AGATHÓN – International Journal of Architecture, Art and Design | n. 19 | 2026 | pp. 262-277
ISSN print: 2464-9309 – ISSN online: 2532-683X | doi.org/10.69143/2464-9309/19152026

Article Info

Received 10 March 2026
Revised 14 April 2026
Accepted 16 April 2026
Published 30 June 2026

NATURE-BASED RETROFIT SYSTEM
Sistema prefabbricato a base biologica per il retrofit energetico degli edifici

NATURE-BASED RETROFIT SYSTEM
Prefabricated bio-based system for the energy retrofit of buildings

Ingrid Maria Paoletti, Laura Elisabetta Malighetti, Francesco Pittau, Federica Pradella, Giorgio Castellano

Abstract

La decarbonizzazione del Patrimonio edilizio richiede interventi di retrofit scalabili capaci di ridurre non solo i consumi operativi ma anche il carbonio incorporato lungo il ciclo di vita. Il contributo propone un quadro di supporto alle decisioni replicabile, che considera prefabbricazione leggera, scenari di fine vita e metriche temporali mediante la Dynamic Life Cycle Assessment (DLCA). Il metodo è applicato al Nature-based Retrofit System (NoRS), sistema di retrofit di facciata a base biologica assemblato a secco con pannelli in paglia di riso lavorabili a controllo numerico (CNC), e confrontato con un sistema in legno di pari prestazioni. I risultati mostrano che l'analisi temporale DLCA rende visibili compromessi che la LCA statica non intercetta: i benefici variano in funzione della rigenerazione della biomassa e degli scenari di fine vita, con una marcata sensibilità alle emissioni differite di metano in discarica.

The decarbonisation of the building stock requires scalable retrofit interventions that reduce not only operational energy consumption but also embodied carbon across the life cycle. This paper proposes a replicable decision-support framework that integrates light prefabrication, end-of-life scenarios, and temporal metrics through Dynamic Life Cycle Assessment (DLCA). The method is applied to the Nature-based Retrofit System (NoRS), a bio-based façade retrofit system assembled dry using CNC-machined rice straw panels, and compared with a timber-based system of equivalent performance. The results show that DLCA temporal analysis reveals trade-offs that static LCA does not capture: benefits vary with biomass regeneration and end-of-life scenarios. They are highly sensitive to delayed methane emissions under landfill conditions.

Keywords

retrofit energetico, involucro edilizio, valutazione dinamica del ciclo vita, materiali a base biologica, fabbricazione digitale

energy retrofit, building envelope, dynamic life cycle assessment, bio-based materials, digital fabrication

Ingrid Maria Paoletti, Full Professor of Building Technology at the Politecnico di Milano (Italy), focuses her research on innovative technologies and materials to develop a new, responsible material culture. E-mail: ingrid.paoletti@polimi.it

Giorgio Castellano, Researcher at the Politecnico di Milano (Italy), is a member of the Material Balance research group. His research investigates innovative construction systems, bio-based materials, and digital fabrication. E-mail: giorgio.castellano@polimi.it

Federica Pradella, PhD Candidate at the Department of Architecture, Built Environment and Construction Engineering, Politecnico di Milano (Italy), focuses on processes and technologies for innovative production and construction. E-mail: federica.pradella@polimi.it

Laura Elisabetta Malighetti, Associate Professor of Architectural Technology at the ABC Department, Politecnico di Milano (Italy), works on the definition of strategies and tools for the design with a focus on bioclimatic technologies. E-mail: laura.malighetti@polimi.it

Francesco Pittau, Associate Professor at the Department of Architecture, Built Environment and Construction Engineering, Politecnico di Milano (Italy), conducts research on embodied carbon in buildings, circularity in the construction sector, and bio-based materials. E-mail: francesco.pittau@polimi.it

La decarbonizzazione del patrimonio edilizio è una priorità per le politiche climatiche e per i Sustainable Development Goals (SDG), in particolare per l'SDG 9 (UN, 2015), come rilevato dal recente report dell'UNEP (2025), secondo cui, per restare su traiettorie compatibili con gli obiettivi climatici, occorre accelerare gli interventi di riqualificazione energetica del patrimonio edilizio esistente e ridurre le emissioni lungo l'intero ciclo di vita. In Europa la Renovation Wave e la revisione della direttiva Energy Performance of Buildings Directive (EPBD) rafforzano questo orientamento (European Commission, 2020; European Union, 2024), introducendo strumenti la cui efficacia è rilevante per ridurre la povertà energetica, che in Italia interessa ancora una quota significativa di famiglie (OIPE, 2025). Come evidenziato da Clemente et alii (2024) la riqualificazione profonda degli edifici pubblici, per essere realmente attuabile e scalabile, richiede processi integrati che non riguardano soltanto la riduzione dei consumi operativi; infatti, il carbonio incorporato costituisce una criticità rilevante quando le strategie restano centrate sulla sola energia d'uso (Röck et alii, 2020; Habert et alii, 2020).

In questo quadro di riferimento l'involucro rappresenta un ambito privilegiato di intervento, poiché può ridurre tempi e variabilità di cantiere se supportato da regole di interfaccia e filiere di fornitura strutturate, come mostrano gli approcci legati alla prefabbricazione e alla modularità (Silva et alii, 2013; Pittau et alii, 2017; van Roosmalen, Herrmann and Kumar, 2021). In particolare, la modularità non è soltanto una scelta costruttiva, ma un dispositivo di gestione della complessità, utile a governare le interfacce e i cicli di sostituzione selettiva (Manni and Valzano, 2023).

È da registrare inoltre un interesse crescente per i materiali a base biologica rispetto al potenziale contributo che possono fornire alla riduzione delle emissioni incorporate e allo stoccaggio temporaneo del carbonio negli edifici (Peñaloza, Erlandsson and Falk, 2016; Pittau et alii, 2019). Tuttavia, tali benefici non sono automatici, poiché dipendono dalle assunzioni sul carbonio biogenico e dagli scenari di fine vita nei quali emissioni differite, come il metano, possono ridurre o annullare gli effetti dello stoccaggio temporaneo (Levasseur et alii, 2010; Göswein et alii, 2020). Studi recenti mostrano che il contributo dei materiali biogenici ai bilanci di carbonio nel settore edilizio dipende dall'effettiva capacità di stoccaggio e dalla coerenza tra scenari di nuova costruzione e di riqualificazione, confermando la necessità di valutazioni esplicite sul piano temporale e sistemico (Priore et alii, 2026). Un eventuale impiego di fibre naturali richiede quindi valutazioni integrate, capaci di affrontare la complessità degli impatti sulla biosfera e di superare letture limitate al solo carbonio incorporato (Sposito and De Giovanni, 2023; Capasso, 2025).

Esistono strategie legate alla prefabbricazione e strumenti di Life Cycle Assessment (LCA) / Dynamic Life Cycle Assessment (DLCA), ma è meno consolidata la loro integrazione in un processo replicabile capace di connettere circolarità e dimensione temporale degli impatti climatici (Lueddeckens, Saling and Guenther, 2020; Müller et alii, 2025). In questo contesto il contributo propone un quadro di supporto alla progettazione (Fig. 1) che si inserisce nel dibattito scientifico sul retrofit dell'involucro, prevedendo principi di Design for Manufacturing and Assembly (DfMA), Design for Disassembly (DfD), fabbricazione digitale delocalizzata e DLCA, con particolare attenzione alla circolarità nel settore delle costruzioni. Il modello è applicato al Sistema di Riqualificazione basato sulla Natura (Nature-based Retrofit System – NoRS), costituito da componenti prefabbricati con pannelli in fibra di paglia di riso, e confrontato con un sistema di riferimento in legno (Bio-based Comparison System – BBCS).

La domanda di ricerca indaga in che misura l'integrazione della prefabbricazione leggera, dei principi DfMA e DfD, di materiali a base biologica e di metriche temporali DLCA consenta di costruire un supporto decisionale replicabile e metodologicamente trasparente per la valutazione comparativa di sistemi di retrofit. L'originalità del contributo rispetto allo stato dell'arte risiede proprio nella valutazione integrata di questi aspetti che la letteratura tende a trattare separatamente o in combinazioni parziali. A questo scopo, il contributo è articolato in una sezione di stato dell'arte sul retrofit off-site e sulla valutazione temporale degli impatti, in una sezione metodologica dedicata al sistema NoRS e alle sue interfacce, quindi nella presentazione dei risultati del confronto con il sistema di riferimento BBCS, seguita da una discussione critica sulle implicazioni, sui limiti, sulla trasferibilità e sulle relazioni con gli SDG.

Retrofit off-site e valutazione temporale degli impatti | La prefabbricazione e la fabbricazione digitale applicate al retrofit dell'involucro costituiscono traiettorie chiave per aumentare la capacità di intervento sul Patrimonio esistente, riducendo la variabilità di cantiere e i tempi di posa in opera e trasferendo parte del controllo qualitativo a processi esternalizzati e ripetibili (Silva et alii, 2013). Studi su moduli prefabbricati per retrofit finalizzati a edifici a energia quasi zero (NZEB) mostrano che l'approccio diventa realmente sistemico solo quando sono codificate regole di interfaccia, logistica e controllo prestazionale, evidenziando inoltre barriere ricorrenti di interoperabilità e implementazione (van Roosmalen, Herrmann and Kumar, 2021). La letteratura sulle strategie su larga scala conferma infine che i benefici in termini di tempi e qualità dipendono fortemente dalle procedure di approvvigionamento, dall'organizzazione della filiera e dalla standardizzazione, più che dal solo pacchetto tecnologico (Pittau et alii, 2017).

I casi richiamati nel presente contributo sono stati selezionati in quanto rappresentativi di differenti combinazioni tra grado di produzione off-site e predisposizione alla circolarità e in quanto comparabili rispetto a sei criteri: rilevanza per il retrofit di facciata, modularità del sistema, grado di prefabbricazione, integrazione di principi di DfD, scala e maturità dell'applicazione, disponibilità di informazioni tecnico-descrittive sufficienti per il confronto. In questa cornice la Figura 2 propone una mappatura concettuale delle principali traiettorie del retrofit off-site secondo due assi, 'off-site intensity' e 'circular readiness': il primo descrive il grado di industrializzazione e prefabbricazione del processo costruttivo; il secondo il livello con cui il sistema integra DfD, sostituzione selettiva, coordinamento modulare e pianificazione del fine vita.

Nella fascia inferiore si collocano quelle soluzioni già presenti sul mercato per le quali la replicabilità è trainata da modelli di servizio e dall'industrializzazione della posa in opera, come nel caso di Energiesprong[1], senza che ciò coincida automaticamente con elevati livelli di reversibilità o di flessibilità architettonica, che dipendono da componenti, giunti e strategie di sostituzione (Manni and Valzano, 2023; Salama, 2017).

Nella fascia intermedia si collocano dimostratori sviluppati in programmi europei, quali EASEE[2], BERTIM[3] e AdESA, che fa parte del progetto 4RinEU[4]: in questi casi si rendono esplicite metodologie progettuali, logiche economico-organizzative e strategie di integrazione dell'involucro, sebbene restino spesso legati a condizioni sperimentali e a filiere non ancora strutturate per una diffusione estesa. Nella fascia superiore si collocano infine le ricerche emergenti, caratterizzate da una maggiore intensità delle attività fuori dal cantiere e da una più elevata predisposizione alla circolarità; è in questo ambito che si inserisce NoRS, proposto come retrofit prefabbricato a base biologica, fondato sulla reversibilità, sulla modularità e sulla gestione selettiva del ciclo di vita.

Nel contesto europeo Energiesprong rappresenta il caso di maggiore maturità di mercato tra quelli esaminati: i suoi punti di forza risiedono nel modello di servizio industrializzato e nella capacità di scala, che hanno consentito interventi rapidi su numerose unità residenziali in Europa. La trasferibilità è elevata nelle filiere produttive strutturate, ma è condizionata dalla standardizzazione tipologica degli edifici destinatari. Il progetto EASEE ha invece sviluppato un approccio ibrido che integra prefabbricazione parziale e intervento in opera, con il merito di aver codificato metodologie di interfaccia e protocolli di verifica prestazionale; il limite è la dipendenza dalle condizioni sperimentali e la difficoltà di transizione verso filiere produttive diffuse.

BERTIM ha dimostrato la fattibilità tecnica di moduli prefabbricati in legno per il retrofit energetico, con buoni risultati in termini di riduzione dei tempi di cantiere; la criticità principale riguarda la limitata integrazione dei principi DfD e la dipendenza dalla disponibilità locale delle filiere del legno strutturale, che ne riduce la trasferibilità in contesti geografici diversi. AdESA ha infine il pregio di aver integrato logiche economico-organizzative e criteri di scalabilità nella progettazione del sistema; il limite risiede nella complessità di implementazione e nell'assenza di una metrica temporale degli impatti climatici che consenta confronti trasparenti con le alternative di mercato.

Nel complesso nessuno dei casi esaminati sembra integrare simultaneamente prefabbricazione leggera, materiali a base biologica, principi DfD e valutazione DLCA: questo divario è ciò che il sistema NoRS intende indagare.

Nel contesto italiano i casi di riqualificazione profonda e decarbonizzazione di edifici pubblici mostrano che la scalabilità e la trasferibilità dipendono soprattutto dalla gestione di processo e dalla verifica delle prestazioni in contesti reali, mentre politiche e strumenti pubblici condizionano direttamente la replicabilità attraverso gli appalti (Clemente et alii, 2024; Lauria et alii, 2025). A livello tecnico diversi studi sulle facciate modulari confermano che connettori e dettagli sono i punti critici per la qualità e le prestazioni, rappresentando il nodo in cui la standardizzazione incontra tolleranze e durabilità dell'edificio esistente (Tushar et alii, 2022; Callegaro et alii, 2023; Alvarez-Alava et alii, 2023). In questo quadro la modularità va intesa come dispositivo di gestione della complessità, perché go-

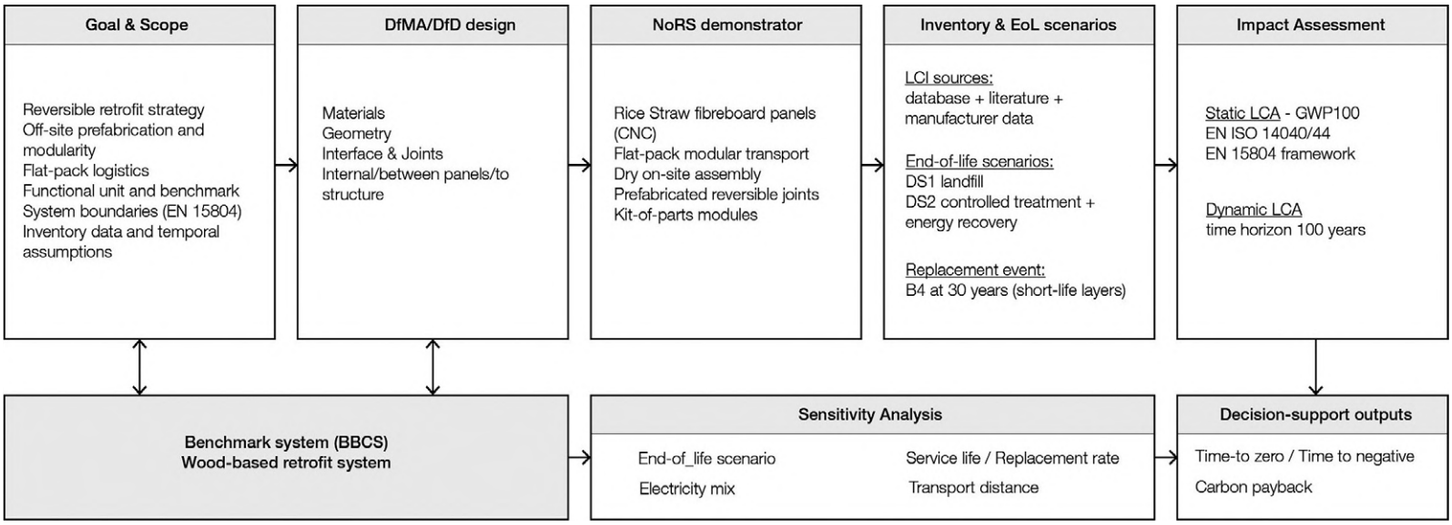


Fig. 1 | Conceptual framework of the contribution: integration of DfMA / DfD design principles, development of the NoRS demonstrator, LCA and DLCA modelling, and generation of decision-support indicators (credit: the Authors, 2026).

verna interfacce, dipendenze tra strati e cicli di sostituzione, condizioni necessarie per garantire la manutenibilità e l'adattabilità nel tempo (Manni and Valzano, 2023).

Quando si introducono obiettivi di circolarità la scalabilità di cantiere non coincide automaticamente con la sostenibilità del ciclo di vita: l'applicazione di metriche di economia circolare nel costruito richiede coerenza tra progettazione, filiera e fine vita (Pomponi and Moncaster, 2017). In tal senso il DfD emerge come prerequisito per abilitare sostituzioni selettive e logistica inversa (Salama, 2017), richiedendo sistemi di valutazione a supporto delle decisioni capaci di misurare il potenziale di riuso dei componenti fin dalla fase di progetto (Paganin et alii, 2024). Studi LCA su strategie DfD mostrano inoltre che i benefici dipendono da ipotesi su durata e scenari realistici, imponendo una trasparenza metodologica rigorosa (Roberts et alii, 2023; Rasmussen, Birkved and Birgisdóttir, 2019).

L'adozione di materiali a base biologica nei sistemi prefabbricati introduce un'ulteriore variabile critica: le prestazioni climatiche dipendono non solo dal contenuto biogenico, ma anche dalla distribuzione temporale dei flussi emissivi. La modellazione del retrofit come assorbitore di carbonio evidenzia che biomasse a rapida rigenerazione, come la paglia di riso, possono offrire vantaggi significativi, ma in modo condizionato da tempi e scenari di fine vita (Pittau et alii, 2019). In modo coerente Thiébat et alii (2025) sottolineano che la sostenibilità delle fibre naturali richiede valutazioni integrate; analogamente, approcci che combinano Environmental-LCA e Social-LCA mostrano che la progettazione a basse emissioni non può limitarsi alla sola riduzione della CO_2, ma deve considerare anche implicazioni sociali e di filiera, soprattutto quando innovazioni di prodotto e strategie di fine vita incidono sull'accessibilità, sui costi e sulla replicabilità delle soluzioni (Palumbo et alii, 2025).

Applicazioni di DLCA rendono inoltre esplicito che scenari di discarica possono generare emissioni differite di metano, mentre il recupero energetico modifica sensibilmente i risultati (Göswein et alii, 2020). Il nodo metodologico è che una LCA statica aggrega flussi emissivi distribuiti nel tempo, mentre la DLCA consente di leggere i profili emissivi annuali (Levasseur et alii, 2010, 2013), integrando quadri analitici espliciti sul piano temporale capaci di affrontare la complessità degli impatti sulla biosfera (Lueddeckens, Saling and Guenther, 2020; Müller et alii, 2025; Sposito and De Giovanni, 2023). In sintesi, lo stato dell'arte evidenzia un divario operativo: la sfida non è soltanto sviluppare nuove tecnologie per la prefabbricazione fuori cantiere o a base biologica, ma integrarle in un quadro replicabile che colleghi processo, circolarità e metriche temporali per supportare decisioni progettuali comparabili e scalabili.

Metodologia | Il presente studio mira a valutare il profilo di impatto climatico lungo il ciclo di vita del NoRS, confrontandolo con quello di un sistema comparativo biogenico (BBCS) e lo fa perseguendo tre obiettivi: 1) rendere confrontabili e trasparenti le scelte progettuali attraverso l'esplicitazione delle assunzioni dei modelli; 2) verificare in che misura una lettura temporale dinamica modifichi l'interpretazione dei risultati rispetto a una LCA convenzionale; 3) identificare i fattori critici che incidono sulla robustezza dei risultati, con particolare attenzione a fine vita, mix elettrico, trasporti e frequenza di sostituzione. BBCS è assunto come sistema di riferimento a base di legno in quanto rappresenta una soluzione comparabile rispetto a funzione, configurazione non portante, prestazione termica, requisito di sicurezza antincendio e vita utile di riferimento; ciò consente di isolare con maggiore trasparenza gli effetti della diversa composizione materica e della diversa temporalità del carbonio biogenico, evitando che il confronto sia alterato da differenze prestazionali non pertinenti.

Per garantire un confronto coerente NoRS e BBCS sono stati equiparati in termini di prestazione termica, assumendo una trasmittanza stazionaria pari a $U = 0{,}19\ W/m^2K$, e resi comparabili rispetto ai requisiti di sicurezza antincendio mediante l'integrazione, per entrambi i sistemi, di uno strato protettivo esterno in classe A1 e di un livello prestazionale assunto equivalente ai fini del confronto. L'analisi si concentra sugli impatti incorporati del sistema di involucro, considerando le fasi di produzione, logistica, sostituzione e fine vita (A1–A5, B4, C1–C4 e D), ed esclude l'energia operativa dell'edificio (B6) per isolare gli effetti delle strategie di filiera e della temporalità dello stoccaggio biogenico (Fig. 3).

Questa impostazione consente non solo la comparazione ambientale tra le alternative di retrofit, ma anche una lettura critica in termini di innovazione dei processi costruttivi, accessibilità degli interventi e gestione responsabile delle risorse lungo il ciclo di vita. In questo senso lo studio si colloca nel quadro di approcci integrati alla valutazione ambientale, capaci di superare una lettura esclusivamente statica del carbonio (Sposito and De Giovanni, 2023).

Fasi operative della ricerca | Le attività di ricerca sono state articolate in sei fasi operative, esplicitate al fine di rendere il procedimento replicabile: Fase 1) ricognizione dello stato dell'arte e selezione dei casi comparativi; Fase 2) definizione dell'Unità Funzionale (UF) e dei confini del sistema; Fase 3) costruzione dell'inventario comparativo dei due sistemi; Fase 4) modellazione LCA e DLCA; Fase 5) analisi di sensitività sui principali parametri critici; Fase 6) interpretazione comparativa dei risultati e verifica della trasferibilità del processo.

NoRS: sistema, processo e interfacce | Il sistema NoRS è configurato come un kit di componenti prefabbricati a base biologica e progettato secondo i principi di DfMA e DfD (Fig. 4). In questa impostazione la riduzione della variabilità in opera è affidata a un sistema basato su componenti e alla codifica delle interfacce. La posa in opera è quindi concepita come un processo ripetibile basato sull'assemblaggio a secco, compatibile con la produzione delocalizzata e con il trasporto di componenti piani. In tale cornice la modularità non agisce solo come criterio di semplificazione esecutiva, ma anche come dispositivo tecnico per governare la manutenibilità e i cicli di sostituzione differenziati dei livelli funzionali (Manni and Valzano, 2023).

Il modulo base NoRS è un elemento non portante la cui stratigrafia (Fig. 5) è stata sviluppata per integrare prestazioni termiche, prefabbricazione

leggera e potenziale di circolarità. Il sistema comprende: a) uno strato comprimibile di compensazione e livellamento a base paglia di (RH-50, Ricehouse S.r.l.) per assorbire le irregolarità del supporto murario esistente; b) pannelli in fibra di paglia di riso ad alta densità (RH700-s, Ricehouse S.r.l.), con funzione di irrigidimento e chiusura del box; c) membrane funzionali per il controllo della diffusione del vapore; d) isolamento primario in fibra di paglia sciolta (RH-L, Ricehouse S.r.l.); e) uno strato esterno di protezione meccanica e finitura di intonaco in classe di resistenza al fuoco A1 (RH210, Ricehouse S.r.l.). L'impiego di sottoprodotti agricoli valorizza inoltre una filiera corta, con potenziali benefici in termini di riduzione delle distanze di trasporto. NoRS adotta infatti una logica di semplificazione materica fondata sull'impiego prevalente di componenti derivati dagli scarti della filiera risicola. Pur non configurandosi come sistema monomateriale in senso stretto, questa impostazione riduce la complessità compositiva dell'involucro e ne rende più leggibili le implicazioni in termini di LCA, sostituzione selettiva e fine vita, in linea con studi recenti sugli involucri a ridotta eterogeneità materica (Bucklin et alii, 2023).

Il processo DfMA segue un flusso di lavoro strutturato dalla progettazione all'assemblaggio: definizione dei pannelli e delle tolleranze, generazione dei pezzi e preparazione delle interfacce, produzione CNC ed etichettatura dei componenti, logistica dei componenti piani e assemblaggio a secco in opera (Fig. 6). La fabbricazione digitale consente di ridurre gli errori, limitare gli sfridi e rendere verificabile la sequenza di montaggio. L'obiettivo non è una produzione di massa centralizzata, ma una prefabbricazione leggera, compatibile con reti di produzione distribuita, purché siano rispettati i requisiti dimensionali e i controlli di qualità.

Per rispondere alla variabilità morfologica del patrimonio edilizio esistente, NoRS adotta una strategia modulare parametrica articolata in tre scale (S, M ed L) e in tre famiglie funzionali (Fig. 7): moduli piani per superfici cieche, moduli ad angolo per la gestione degli spigoli e moduli integrati per serramenti e cavedi impiantistici.

Le regole di interfaccia del sistema, che costituiscono la base tecnica della reversibilità e della trasferibilità del kit, sono organizzate in tre livelli: 1) giunti interni al sistema box, legati alla precisione e alle tolleranze di taglio della fabbricazione CNC; 2) giunti tra moduli adiacenti, responsabili della continuità termo-igrometrica e della tenuta all'aria e all'acqua; 3) connessioni tra sistema ed esistente, realizzate tramite piastre metalliche, che consentono il trasferimento dei carichi e l'assorbimento delle tolleranze del supporto. In questa logica la manutenzione e le sostituzioni selettive sono considerate parte integrante del ciclo di vita del sistema.

L'elemento centrale dell'interfaccia è un connettore meccanico multifunzionale, sviluppato nell'ambito di una domanda di brevetto[5], collocato lungo i giunti orizzontali e concepito per integrare assemblaggio, trasferimento dei carichi e compartimentazione antincendio, agendo anche come elemento tagliafuoco (Fig. 8). Questo componente media la transizione tra la precisione della fabbricazione digitale e le tolleranze del costruito esistente, consentendo la posa a secco, l'autoallineamento e la sostituzione selettiva dei moduli in coerenza con la logica DfD. NoRS è presentato come dimostratore di sistema e non come prodotto già certificato. Il processo identifica quindi i requisiti prestazionali da verificare nella transizione verso un'applicazione industriale: comportamento igrotermico dei nodi in regime dinamico, tenuta all'aria e all'acqua dei giunti meccanici, durabilità delle fibre naturali in condizioni di umidità variabile, comportamento al fuoco dell'assemblato, prestazioni acustiche e affidabilità delle interfacce nel lungo periodo. Nel presente contributo tali aspetti non sono assunti come già conformi, ma identificati come condizioni di verifica necessarie al passaggio da dimostratore a prodotto, distinguendo tra la dimostrazione di fattibilità metodologico-comparativa e il percorso di conformità normativa.

Unità funzionale e confini del sistema | La comparazione è impostata su una UF definita come 1 metro quadrato di sistema di retrofit di facciata con una Reference Service Life (RSL) di 60 anni (Tab. 1). Il perimetro della valutazione segue la struttura modulare del kit NoRS e comprende: approvvigionamento delle materie prime e produzione (A1–A3), trasporto e installazione (A4–A5), sostituzione programmata dei componenti con vita utile inferiore (B4), processi di fine vita (C1–C4) e benefici netti oltre i confini del sistema (D). L'impostazione metodologica segue gli standard UNI EN ISO 14040: 2021 (UNI, 2021b), UNI EN ISO 14044:2021 (UNI, 2021c), UNI EN 15804:2021 (UNI, 2021a) e UNI EN 15978:2011 (UNI, 2011). Gli strati non differenzianti tra le due soluzioni sono stati esclusi mediante una regola esplicita (massa < 1%), applicata in modo simmetrico.

Inventario, fonti dei dati e scenari | I processi relativi a materiali, energia e trasporti sono stati modellati integrando i database LCA standard (Ecoinvent 3.10) e dati di letteratura, mentre le schede tecniche fornite da Ricehouse S.r.l. sono state impiegate per definire le caratteristiche fisiche e prestazionali delle componenti in fibra di paglia di riso. Il confronto tra NoRS e BBCS si basa su un inventario dettagliato delle stratigrafie e delle masse per

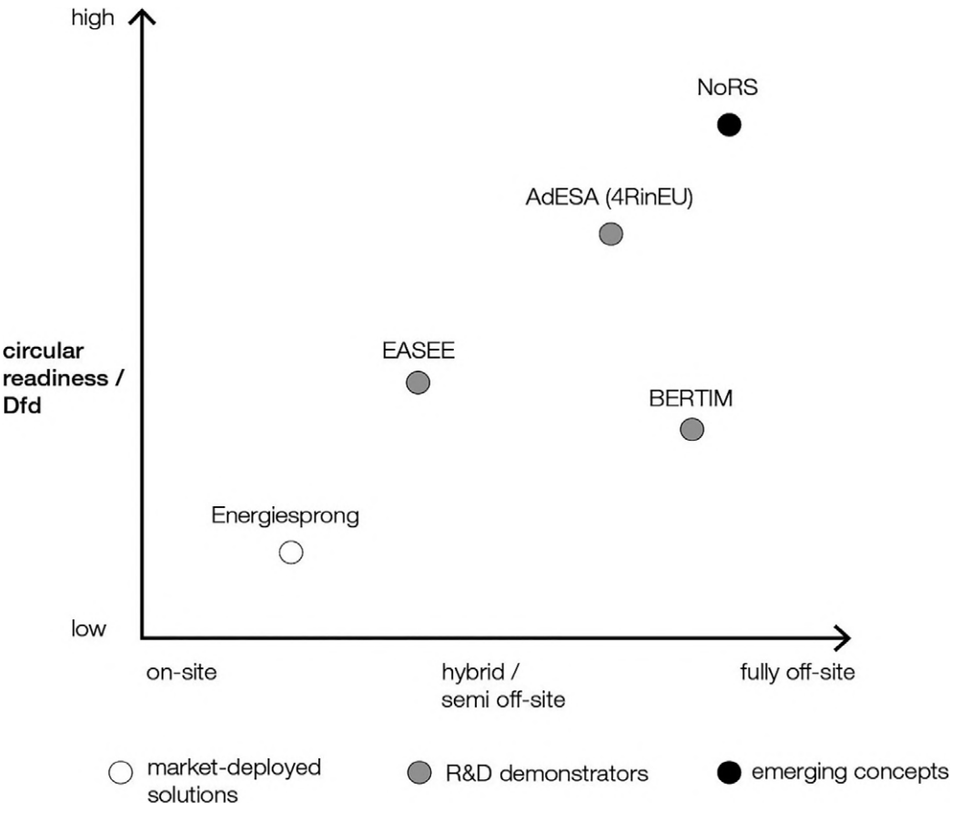


Fig. 2 | Conceptual mapping of off-site retrofit solutions according to off-site construction intensity and degree of circular readiness (DfD potential). The figure presents selected representative market cases, research demonstrators, and the NoRS system discussed in this contribution (credit: the Authors, 2026).

UF (Fig. 9; Tab. 2). In fase d'uso il modello prevede un evento di sostituzione al 30° anno per gli strati funzionali con vita utile inferiore alla RSL (B4), mentre i componenti principali mantengono un Estimated Service Life (ESL) di 60 anni. Per il fine vita sono stati adottati due scenari alternativi: DS1, caratterizzato dalla prevalenza del conferimento in discarica sanitaria, e DS2, orientato al recupero energetico e al trattamento controllato della biomassa (Tab. 3). L'obiettivo non è individuare uno scenario 'ottimale', ma rendere esplicita la dipendenza dei risultati dalle filiere di fine vita (EoL) e dalle emissioni differite di metano associate alla degradazione anaerobica dei materiali biogenici.

La costruzione degli scenari DS1 e DS2 è ancorata al contesto normativo italiano. I materiali biogenici da costruzione, come la paglia di riso e il legno, e le filiere di fine vita controllate (compostaggio, recupero energetico) non sono ancora sistematicamente strutturate, rendendo lo scenario DS1 (discarica sanitaria) il riferimento più realistico per la quota di biomassa non intercettata dalle filiere specializzate. Lo scenario DS2 rappresenta invece la traiettoria verso cui le politiche europee orientano il settore, in linea con la Direttiva 2008/98/EC (European Parliament and Council of the European Union, 2008) e con gli obiettivi dell'EPBD (European Union, 2024). I due scenari non hanno quindi natura probabilistica ma comparativa e normativa: DS1 descrive le condizioni attuali più conservative, DS2 le condizioni abilitanti per un beneficio climatico pieno.

DLCA e indicatori temporali | Accanto alla LCA convenzionale lo studio applica una metodologia DLCA (Fig. 10). La modellazione adotta un approccio esplicito sul piano temporale, basato sulla distribuzione annuale dei flussi emissivi e di assorbimento lungo un orizzonte di 100 anni, così da rendere leggibile la diversa tempistica tra emissioni iniziali, sostituzioni in esercizio e processi di rigenerazione della biomassa. Le emissioni differite di metano associate agli scenari di fine vita sono trattate come flussi temporizzati, coerenti con le ipotesi di degradazione anaerobica o di recupero energetico adottate nei due scenari DS1 e DS2. Il modello combina dati di inventario derivati da database standard e dalla letteratura, organizzati in una procedura comparativa LCA / DLCA finalizzata a restituire profili emissivi istantanei e cumulativi, nonché indicatori sintetici utili al confronto tra alternative di retrofit. Nel caso di DS1 il metano biogenico rilasciato in discarica sanitaria è modellato come emissione differita associata alla degradazione anaerobica della biomassa; nel caso di DS2, il trattamento controllato della biomassa e il recupero energetico del legno sono modellati come scenari alternativi capaci di ridurre le emissioni nette e di generare crediti energetici nel Modulo D.

La modellazione LCA è stata sviluppata con PRé Consultants SimaPro 9.6.0.1. Il calcolo della DLCA è stato condotto mediante lo strumento Dyn-CO_2 (CIRAIG, Università di Montréal), che restituisce i profili di forzante radiativa istantanea (GWI inst) e cumulativa (GWI cum) in W/m², nonché l'impatto relativo espresso in CO_2eq (GWP), seguendo la formulazione di Levasseur et alii (2010; 2013). I flussi di CO_2, CH_4, CO e N_2O sono trattati separatamente, distinguendo contributi fossili, biogenici e da trasformazione del suolo, coerentemente con l'approccio di Göswein et alii (2020). Nel modello i tempi di rigenerazione della biomassa sono assunti pari a 1 anno per la paglia di riso e a 90 anni per il legno. Oltre ai profili emissivi istantanei e cumulativi, sono calcolati indicatori sintetici quali 'time-to-zero' e 'time-to-negative', utili a descrivere rispettivamente il tempo di neutralizzazione degli impulsi iniziali e il momento in cui il sistema diventa un assorbitore netto di carbonio (Levasseur et alii, 2013; Müller et alii, 2025).

Analisi di sensitività e replicabilità | L'analisi di sensibilità è strutturata in quattro driver fattori principali: 1) variazione degli scenari EoL (DS1 vs DS2); 2) influenza del mix elettrico sui calcoli dei crediti nel Modulo D; 3) impatto delle distanze di trasporto e della logistica; 4) variazione della vita utile e del ritmo di sostituzione dei componenti. Tale impostazione è coerente con il dibattito scientifico sulla sensibilità ai parametri temporali (Shimako et alii, 2018). La combinazione di processi tratti da banche dati standard e da dati primari consente di restituire un confronto metodologicamente trasparente e replicabile, fondato sulla sistematizzazione dell'inventario e sull'esplicitazione delle assunzioni dei modelli (Brandão et alii, 2013; Müller et alii, 2025).

Risultati | L'analisi dei risultati si articola in quattro livelli: inventario emissivo per moduli di ciclo di vita, profili di forzante radiativa istantanea, profili di forzante radiativa cumulativa e indicatori sintetici di impatto relativo. I risultati della DLCA mostrano che l'esplicitazione della dimensione temporale modifica in modo sostanziale l'interpretazione del retrofit a base biologica, rendendo visibili sia il processo di assorbimento e rigenerazione della biomassa sia gli effetti del fine vita, in particolare le emissioni differite di metano in discarica. Nel modello, i flussi emissivi e di assorbimento sono distribuiti su una timeline annuale e restituiti come profili di forzante radiativa istantanea e cumulativa su un orizzonte di 100 anni, includendo sostituzioni in esercizio (B4) e i due scenari di fine vita, DS1 e DS2 (Levasseur et alii, 2010, 2013). Le grandezze emissive e di assorbimento in ingresso sono riportate come inventario per i moduli di ciclo di vita e come parametri di assorbimento e di stoccaggio biogenico (Tab. 4).

L'inventario aggregato per moduli (Tab. 5) evidenzia che, in entrambe le alternative, DS1 (discarica) rappresenta uno dei contributi più impattanti: l'elevata incidenza è dovuta al rilascio di metano associato alla degradazione dei materiali biogenici in discarica sanitaria. La differenza tra i due sistemi

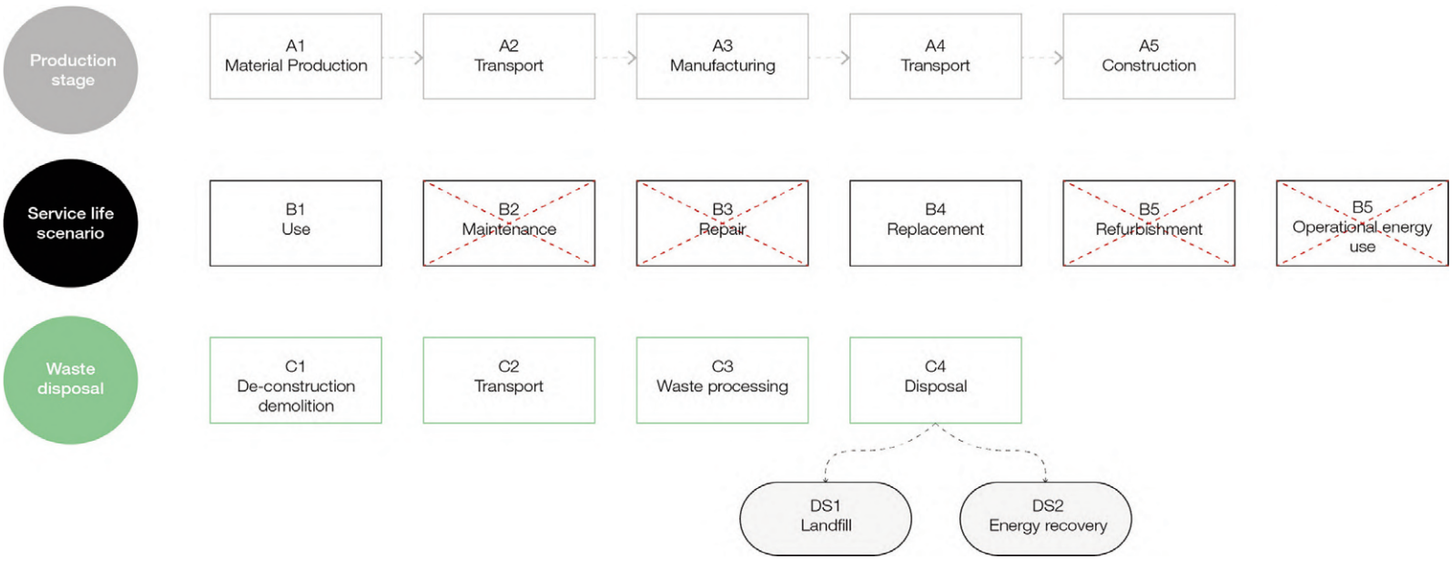
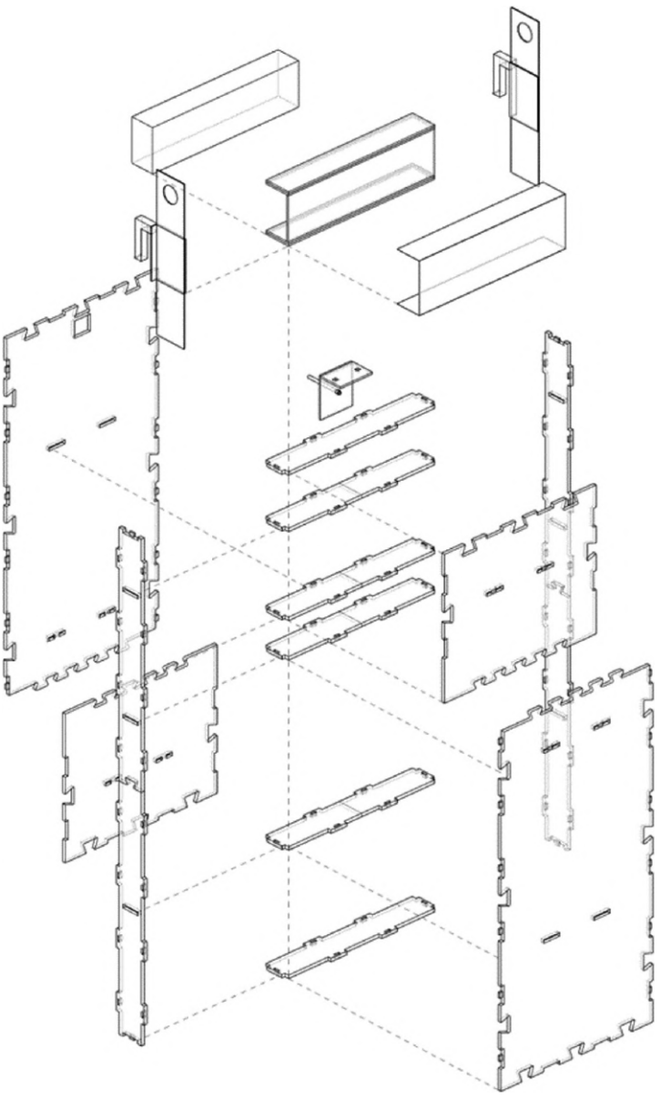


Fig. 3 | System boundaries and life cycle modules adopted in the study (UNI, 2021a). Modules excluded from the system boundary are crossed out; DS1 and DS2 represent alternative end-of-life scenarios (credit: the Authors, 2026).

Retrofit system	U-value	Type of system	Performance	Lifespan
1 m²	0.19 W/m²K	Non-load-bearing structure	Identical fire safety (A1 class for the extension layer)	60-years lifespan is assumed to be the same as residential buildings' Reference Service Life (RSL)

Tab. 1 | Definition of the Functional Unit used for the comparative assessment (credit: the Authors, 2026).

Fig. 4 | The NoRS base module with prefabricated component kit, stiffening elements, functional layers, and assembly devices (credit: the Authors, 2026).



è principalmente legata alla quantità e alla tipologia di biomassa impiegata: una maggiore quota di paglia di riso nel dimostratore riduce il contributo fossile complessivo in alcune fasi, ma aumenta la sensibilità al metano se il fine vita non è gestito in filiere controllate. In parallelo i parametri di assorbimento evidenziano la divergenza temporale tra biomasse a rapida rigenerazione (paglia con rotazione annuale) e biomasse a rigenerazione lenta (legno con rotazione 90 anni), condizione che incide direttamente sul profilo dinamico (Lueddeckens, Saling and Guenther, 2020).

Il profilo di forzante radiativa istantanea evidenzia una rapida riduzione dell'impatto già dopo il primo anno, associata alla rigenerazione delle colture. Nel caso NoRS la curva scende sotto lo zero: la maggiore quota di biomassa biogenica consente infatti di compensare più rapidamente le emissioni iniziali (Fig. 11). La sostituzione a 30 anni (B4) determina un incremento puntuale, coerente con il rinnovo degli strati a vita utile più breve; non è invece prevista la sostituzione programmata dei principali componenti biogenici. A fine vita, nello scenario DS1 si osserva un incremento marcato della forzante, dovuto alla decomposizione del biogenico in discarica sanitaria. Nel modello sono considerati circa 60 kg di paglia per NoRS, contro circa 20 kg di paglia e 14 kg di legno per BBCS; il ritorno a valori prossimi allo zero richiede circa 30 anni dopo l'EoL. Tale dinamica è coerente con precedenti applicazioni DLCA su sistemi di retrofit in paglia (Göswein et alii, 2020).

Il profilo di forzante radiativa cumulativa (Fig. 12) conferma che DS1 genera gli impatti più elevati per entrambe le alternative: il rilascio di metano in discarica determina un rapido incremento della curva, riducendo o annullando parte del beneficio associato allo stoccaggio temporaneo del carbonio. In DS2 i profili migliorano sensibilmente e possono raggiungere valori negativi, evidenziando come la neutralità climatica non sia una proprietà intrinseca del materiale, ma dipenda da assunzioni modellistiche e dalla coerenza delle filiere di fine vita con la strategia progettuale (Brandão et alii, 2013; Müller et alii, 2025). Nel confronto tra NoRS e BBCS, la diversa tempistica di rigenerazione emerge come fattore discriminante.

Infine la lettura in termini di impatto relativo sintetizza ulteriormente i risultati: NoRS presenta l'impatto più contenuto e raggiunge condizioni negative prima del sistema di riferimento a base di legno; BBCS non può essere assunto automaticamente come climaticamente neutro, poiché lo stoccaggio nel legno non compensa di per sé le emissioni lungo la vita utile se la ricrescita è lenta e/o se il fine vita comporta emissioni significative (Fig. 13). Convertendo la forzante cumulativa in metriche equivalenti e analizzando indicatori temporali sintetici, nel modello il GWP diventa negativo dopo circa 25 anni per NoRS e dopo circa 58 anni per BBCS. Il differenziale evidenzia che un beneficio climatico significativo si ottiene solo quando il carbonio è rapidamente riassorbito dalla risorsa di biomassa e quando il fine vita limita le emissioni di metano. Nel complesso i risultati confermano la necessità di esplicitare scenari e di condurre analisi di sensitività su elementi critici, EoL, crediti in D, trasporti e sostituzioni (Shimako et alii, 2018).

Relazione con gli SDG: mappatura critica | Gli SDG direttamente pertinenti allo studio sono quattro. L'SDG 9 (Industria, innovazione e infrastrutture) è quello centrale: il modello proposto integra la fabbricazione digitale, la prefabbricazione leggera e le metriche temporali in un approccio industrializzabile per il retrofit dell'involucro, contribuendo all'innovazione dei processi costruttivi e alla scalabilità delle soluzioni. L'SDG 11 (Città e comunità sostenibili) è coinvolto dalla capacità del sistema di intervenire sugli edifici occupati, riducendo i tempi di cantiere e il disagio abitativo, con ricadute positive

Code	Typology	Material	Thickness [mm]	Density [kg/m³]	λ [W/mK]	Mass [kg/m²]	U [W/m²K]	Rt [m²K/W]	Lifespan [year]	Waste treatment category	Rotation period
BBCS											
	existing building	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1	adaptation layer	RH-P50	80	50	0.039	4	-	2.05	60	no potential	1
2	inner layer	OSB	18	510	0.12	9.18	-	0.15	60	wood	-
3	insulation	RH-L	150	125	0.05	18.75	-	3	60	fast composting	1
4	structure	timber frame wood	-	500	0.12	13.5	-	-	60	wood	90
5	external layer A1 fireclass	fermacell firepanel	18	1200	0.38	21.6	-	0.05	30	no potential	1
stationary							0.19				
NoRS											
	existing building	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1	adaptation layer	RH-P50	80	50	0.039	4	-	2.05	60	no potential	1
2	inner layer	RH700-S	18	700	0.12	12.6	-	0.15	60	no potential	-
3	insulation	RH-L	150	125	0.05	18.75	-	2.83	60	fast composting	1
4	external layer	RH700-S	18	700	0.12	12.6	-	0.15	60	no potential	1
5	external layer A1 fireclass	RH210	4	1150	0.38	4.6	-	0.01	30	no potential	1
stationary							0.19				

Tab. 2 | Detailed inventory: BBCS vs NoRS (credit: the Authors, 2026).

sulla resilienza delle comunità urbane vulnerabili. L'SDG 12 (Consumo e produzione responsabili) è perseguito attraverso la logica DfD e la filiera corta della paglia di riso, che orientano verso modelli di produzione e consumo a ridotto impatto e verso la sostituzione selettiva dei componenti anziché la demolizione. L'SDG 13 (Lotta contro il cambiamento climatico) è affrontato attraverso la riduzione del carbonio incorporato e la gestione temporale dei flussi climatici lungo il ciclo di vita, con l'obiettivo di contribuire alla decarbonizzazione del patrimonio edilizio.

Gli SDG indirettamente interessati comprendono l'SDG 7 (Energia pulita e accessibile), poiché il miglioramento dell'involucro riduce i consumi energetici operativi e può contribuire alla mitigazione della povertà energetica, e l'SDG 8 (Lavoro dignitoso e crescita economica), poiché il modello di produzione distribuita può generare occupazione qualificata locale. L'SDG 15 (Vita sulla terra) è indirettamente coinvolto dall'impiego di biomasse agricole a rapida rigenerazione come alternativa ai materiali estrattivi, con potenziali benefici sulla gestione del suolo agricolo.

Emergono tuttavia taluni compromessi. Con l'SDG 1 (Sconfiggere la povertà) e l'SDG 10 (Ridurre le disuguaglianze) il nodo principale riguarda i costi iniziali del sistema, che possono risultare inaccessibili per le fasce di popolazione più vulnerabili in assenza di politiche di incentivazione e governance della filiera. Con l'SDG 12 esiste un conflitto tra recupero energetico e riuso del materiale nel fine vita poiché lo scenario DS2 riduce le emissioni di metano attraverso l'incenerimento controllato, ma preclude il riuso dei componenti. Con l'SDG 13 il compromesso riguarda la dipendenza dei benefici climatici dalla coerenza delle filiere di fine vita: in assenza di infrastrutture controllate, lo scenario DS1 mostra che le emissioni differite di metano sono in grado di annullare i vantaggi dello stoccaggio biogenico.

Discussione e limiti dello studio | L'introduzione di metriche temporali mediante DLCA sposta la valutazione ambientale da una lettura retrospettiva a uno strumento di supporto alle decisioni: l'analisi non riguarda soltanto l'entità degli impatti, ma anche la loro distribuzione nel tempo. In tal modo la lettura dei risultati non valuta soltanto la robustezza del confronto ambientale, ma anche la possibilità di interpretare criticamente come diverse scelte di filiera e di fine vita producano sinergie o compromessi rispetto agli obiettivi di innovazione, equità, responsabilità materiale e mitigazione climatica.

La DLCA permette di leggere le traiettorie del cambiamento climatico lungo il ciclo di vita dell'edificio, rendendo espliciti profili emissivi e compensazioni temporali che la LCA convenzionale tende a comprimere in un unico indicatore (Negishi et alii, 2019). L'approccio qui presentato affronta le criticità temporali, riconosciute come limite strutturale della LCA statica e particolarmente rilevanti per materiali a base biologica (Lueddeckens, Saling and Guenther, 2020), in coerenza con i più recenti quadri analitici espliciti sul piano temporale (Müller et alii, 2025). La crescente disponibilità di procedure operative per la DLCA e la temporalizzazione dei processi di sfondo ne rendono più praticabile l'applicazione in contesti operativi (Cardellini et alii, 2018; Pigné et alii, 2020), come confermato dalla letteratura sul costruito (Su et alii, 2021).

L'applicazione della DLCA al sistema NoRS rende visibile ciò che la LCA statica tende ad appiattire: il differenziale di 33 anni nel raggiungimento del GWP negativo tra NoRS e BBCS non è un dettaglio tecnico, ma un dato con ricadute progettuali rilevanti. Una scelta di filiera, la paglia di riso con rigenerazione annuale contro il legno con rotazione novantennale, può determinare se un sistema contribuisce alla mitigazione climatica entro una finestra temporale coerente con gli obiettivi al 2050, oppure oltre tale finestra.

Se la trasferibilità metodologica del metodo risulta elevata, grazie alle unità funzionali, ai confini EN 15804, agli scenari e alle analisi di sensitività, la maturità del sistema NoRS come prodotto resta condizionata da verifiche prestazionali estese, in particolare sulla sicurezza antincendio, sul comportamento igrotermico dei nodi, sulla tenuta dei giunti e sulla durabilità. In questo senso i risultati costituiscono una dimostrazione di fattibilità metodologico-comparativa più che una certificazione di sistema.

La progettazione del connettore meccanico affronta il tema cruciale delle interfacce, che la letteratura identifica tra i principali ostacoli alla circolarità effettiva (Salama, 2017). Tuttavia, il disassemblaggio e la sostituzione selettiva presuppongono non solo la compatibilità geometrica, ma anche la logistica inversa e la gestione di fine vita. In questo quadro una delle evidenze principali della DLCA riguarda la sensibilità dei risultati alle emissioni differite di metano in discarica, capaci di ridurre o annullare i benefici dello stoccaggio temporaneo: scenari EoL controllati diventano quindi una condizione abilitante, non un dettaglio di modellazione.

Ai fini di una corretta interpretazione dei risultati è infine opportuno distinguere tre categorie di limiti. Sul piano dei dati, la caratterizzazione dei materiali a base di paglia di riso dipende in parte dalle schede tecniche fornite dal produttore, mentre i dati di base provengono da database standard (Ecoinvent 3.10) e potrebbero non riflettere appieno le specificità della filiera italiana. Sul piano della modellazione gli scenari di fine vita DS1 e DS2 restituiscono traiettorie plausibili ma non esaustive delle filiere reali e l'assenza di una valutazione S-LCA lascia inesplorata, in parte, la dimensione sociale degli impatti. L'integrazione di metriche S-LCA consentirebbe di rendere più esplicita la dimensione sociale del retrofit, collegando carbonio incorporato e indicatori di equità per le comunità vulnerabili (Palumbo et alii, 2025). La simulazione di scenari logistici su sca-

la distrettuale rappresenterebbe infine la frontiera operativa più prossima, in cui la coerenza tra progetto, filiera e politica pubblica può essere verificata empiricamente.

Sul piano prestazionale diversi aspetti del sistema NoRS non sono ancora stati verificati sperimentalmente: comportamento igrotermico dei nodi in regime dinamico, tenuta all'aria e all'acqua dei giunti meccanici, durabilità delle fibre naturali in condizioni di umidità variabile, comportamento al fuoco dell'assemblato e prestazioni acustiche.

Le barriere alla diffusione agiscono a diversi livelli. Quelle tecnico-normative riguardano l'assenza di classificazioni standardizzate per i rifiuti biogenici da costruzione e la mancanza di un certificato Environmental Product Declaration (EPD) per i materiali a base di paglia di riso, che ostacolano l'integrazione nei capitolati pubblici e nei processi di appalto. Quelle economiche includono i costi iniziali più elevati rispetto alle soluzioni convenzionali e la difficoltà di valorizzare economicamente i benefici differiti dello stoccaggio biogenico lungo l'arco del ciclo di vita. Quelle organizzative riguardano la necessità di coordinare filiere distribuite, in assenza di modelli di servizio consolidati, per il retrofit a base biologica su scala industriale. Quelle di fine vita sono tra le più critiche: la mancanza di infrastrutture per il compostaggio o per il recupero energetico controllato dei materiali biogenici da costruzione rischia di vanificare i benefici dello stoccaggio temporaneo del carbonio, come evidenziato dai risultati dello scenario DS1.

Sul piano della trasferibilità il quadro metodologico – unità funzionale normalizzata, confini EN 15804, scenari di fine vita comparativi e indicatori temporali sintetici – è applicabile a qualsiasi sistema di retrofit dell'involucro, indipendentemente dalla tecnologia, dal materiale e dal luogo di utilizzo, a condizione che siano disponibili dati di inventario adeguati e che gli scenari di fine vita siano esplicitati con analoga trasparenza. Il quadro è inoltre potenzialmente applicabile ad altri settori disciplinari che affrontano la valutazione di sistemi costruttivi a base biologica.

In sintesi, il caso NoRS mostra che i benefici climatici dei materiali a base biologica dipendono da un insieme di condizioni che trascendono la scelta del materiale stesso, coinvolgendo la gestione della filiera, gli strumenti di valutazione e il quadro normativo di riferimento. Rendere queste condizioni esplicite e misurabili è una delle direzioni più produttive per la ricerca sul retrofit sostenibile nei prossimi anni.

The decarbonisation of the building stock is a priority for climate policies and for the Sustainable Development Goals (SDGs), particularly SDG 9 (UN, 2015), as highlighted in the recent UNEP (2025) report, which states that, to remain on trajectories compatible with climate targets, it is necessary to accelerate energy retrofit interventions in the existing building stock and reduce emissions across the entire life cycle. In Europe, the Renovation Wave and the revision of the Energy Performance of Buildings Directive (EPBD) reinforce this direction (European Commission, 2020; European Union, 2024), introducing instruments whose effectiveness is crucial for reducing energy poverty, which still affects a significant share of households in Italy (OIPE, 2025). As highlighted by Clemente et alii (2024), deep renovation of public buildings, to be truly feasible and scalable, requires integrated processes that go beyond mere reductions in operational energy consumption. Indeed, embodied carbon represents a major critical issue when strategies remain focused solely on use-phase energy (Röck et alii, 2020; Habert et alii, 2020).

Within this framework, the building envelope is a key area for intervention, as it can reduce construction time and site variability when supported by clear interface rules and structured supply chains, as demonstrated by approaches based on prefabrication and modularity (Silva et alii, 2013; Pittau et alii, 2017; van Roosmalen, Herrmann and Kumar, 2021). In particular, modularity is not merely a construction choice but a means of managing complexity, useful for controlling interfaces and enabling selective replacement cycles (Manni and Valzano, 2023). There is also growing interest in bio-based materials for their potential to reduce embodied emissions and to temporarily store carbon in buildings (Peñaloza, Erlandsson and Falk, 2016; Pittau et alii, 2019). However, these benefits are not automatic, as they depend on assumptions about biogenic carbon and on end-of-life scenarios, in which delayed emissions, such as methane, may reduce or negate the effects of temporary storage (Levasseur et alii, 2010; Göswein et alii, 2020). Recent studies show that the contribution of biogenic materials to carbon balances in the construction sector depends on actual storage capacity and on consistency between new construction and retrofit scenarios, confirming the need for explicit evaluations at both temporal and systemic levels (Priore et alii, 2026). The potential use of natural fibres therefore requires integrated assessments capable of addressing the complexity of impacts on the biosphere and of overcoming interpretations limited solely to embodied carbon (Sposito and De Giovanni, 2023; Capasso, 2025).

Strategies for prefabrication and tools such as Life Cycle Assessment (LCA) and Dynamic Life Cycle Assessment (DLCA) already exist; however, their integration into a replicable process that links circularity with the temporal dimension of climate impacts remains less consolidated (Lueddeckens, Saling and Guenther, 2020; Müller et alii, 2025). Within this context, the contribution proposes a design support framework (Fig. 1) that engages with the scientific debate on building envelope retrofit, incorporating principles of Design for Manufacturing and Assembly (DfMA), Design for Disassembly (DfD), distributed digital fabrication, and DLCA, with particular attention to circularity in the construction sector. The model is applied to the Nature-based Retrofit System (NoRS), composed of prefabricated components made from rice straw fibre panels, and is compared with a timber-based reference system (Bio-based Comparison System – BBCS).

The research question investigates to what extent integrating light prefabrication, DfMA and DfD principles, bio-based materials, and DLCA temporal metrics enables the development of a replicable, methodologically transparent decision-sup-

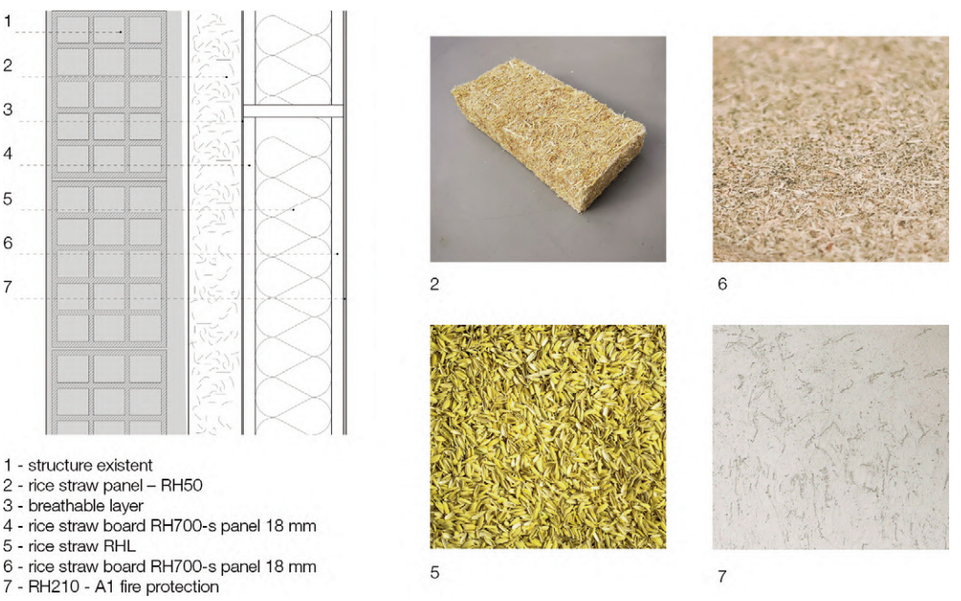


Fig. 5 | Stratigraphy of the NoRS module and components derived from rice cultivation by-products (credit: the Authors and Ricehouse S.r.l., 2026).

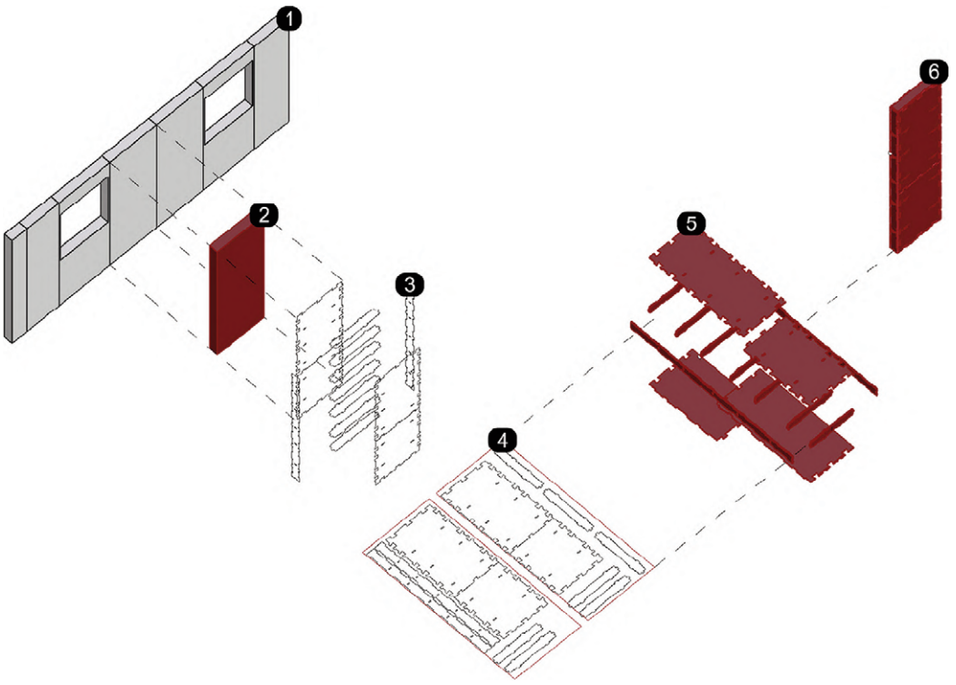


Fig. 6 | Digital fabrication process of the NoRS system (credit: the Authors, 2026).

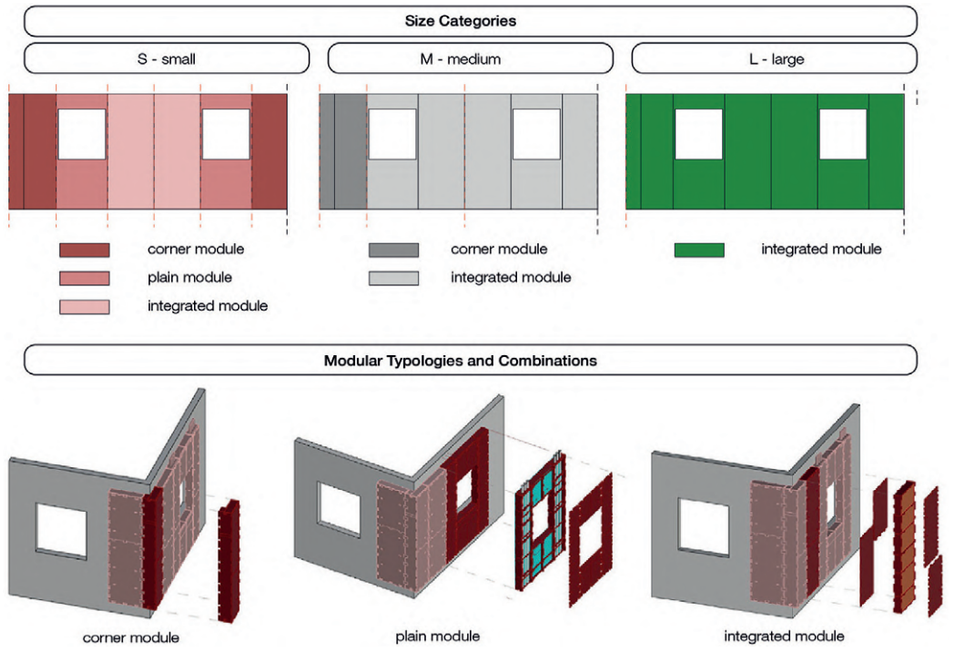


Fig. 7 | Modular strategy of the NoRS system: S, M, and L (credit: the Authors, 2026).

port tool for the comparative evaluation of retrofit systems. The originality of the contribution with respect to the state of the art lies in the integrated evaluation of these aspects, which the literature tends to address separately or in partial combinations. To this end, the contribution is structured as follows: a state-of-the-art section on off-site retrofit and the temporal assessment of impacts; a methodological section dedicated to the NoRS system and its interfaces; a presentation of the results of the comparison with the BBCS reference system; and finally, a critical discussion of implications, limitations, transferability, and relationships with the SDGs.

Off-site retrofit and temporal assessment of impacts | Prefabrication and digital fabrication applied to building envelope retrofit represent key trajectories for increasing intervention capacity within the existing building stock, reducing on-site variability and installation time, and shifting part of quality control to externalised and repeatable processes (Silva et alii, 2013). Studies on prefabricated retrofit modules for nearly zero-energy buildings (NZEB) show that the approach becomes truly systemic only when interface rules, logistics, and performance control are codified, while also highlighting recurring barriers to interoperability and implementation (van Roosmalen, Herrmann and Kumar, 2021). The literature on large-scale strategies further confirms that benefits in terms of time and quality depend strongly on procurement procedures, supply chain organisation, and standardisation, rather than solely on the technological package (Pittau et alii, 2017). The case studies referenced in this contribution were selected as they are representative of different combinations between the degree of off-site production and readiness for circularity, and because they are comparable according to six criteria: relevance for façade retrofit, system modularity, degree of prefabrication, integration of DfD principles, scale and maturity of application, and availability of sufficient technical-descriptive information for comparison. Within this framework, Figure 2 presents a conceptual mapping of the main trajectories of off-site retrofit along two axes: off-site intensity and circular readiness. The former describes the degree of industrialisation and prefabrication of the construction process; the latter indicates the extent to which the system integrates DfD, selective replacement, modular coordination, and end-of-life planning.

In the lower range are solutions already available on the market, where replicability is driven by service models and the industrialisation of installation processes, as in the case of Energiesprong[1], without this necessarily corresponding to high levels of reversibility or architectural flexibility, which instead depend on components, joints, and replacement strategies (Manni and Valzano, 2023; Salama, 2017). In the intermediate range are demonstrators developed within European programmes, such as EASEE[2], BERTIM[3], and AdESA, part of the 4RinEU[4] project: in these cases, design methodologies, economic-organisational logics, and envelope integration strategies are made explicit, although they often remain linked to experimental conditions and to supply chains not yet structured for large-scale diffusion. In the upper range, finally, are emerging research approaches, characterised by a higher intensity of off-site activities and greater readiness for circularity; it is within this domain that NoRS is positioned, proposed as a bio-based prefabricated retrofit system founded on reversibility, modularity, and selective life-cycle management.

Within the European context, Energiesprong represents the most mature market case among

those examined: its strengths lie in its industrialised service model and scalability, which have enabled rapid interventions across numerous residential units. Its transferability is high within structured production supply chains, but the typological standardisation of the target buildings conditions it. The EASEE project, on the other hand, developed a hybrid approach integrating partial prefabrication with on-site intervention, with the merit of codifying interface methodologies and performance verification protocols; its limitation lies in its reliance on experimental conditions and the difficulty of transitioning to widely established production chains.

BERTIM has demonstrated the technical feasibility of prefabricated timber modules for energy retrofit, achieving significant reductions in construction time; the main limitations concern limited integration of DfD principles and dependence on local structural timber supply chains, which limit transferability across different geographical contexts. Finally, AdESA has the merit of integrating economic-organisational logics and scalability criteria into system design; however, its limitation lies in the complexity of implementation and in the absence of a temporal metric of climate impacts that would enable transparent comparison with market alternatives.

Overall, none of the examined cases appears to simultaneously integrate light prefabrication, bio-based materials, DfD principles, and DLCA evaluation. This gap is precisely what the NoRS system seeks to investigate.

Within the Italian context, cases of deep renovation and decarbonisation of public buildings show that scalability and transferability depend primarily on process management and performance verification in real-world contexts, while public policies and instruments directly influence replicability through procurement mechanisms (Clemente et alii, 2024; Lauria et alii, 2025). At the technical level, several studies on modular façades confirm that connectors and detailing represent critical points for quality and performance, constituting the interface where standardisation meets tolerances and the durability of the existing building (Tushar et alii, 2022; Callegaro et alii, 2023; Alvarez-Alava et alii, 2023). Within this framework, modularity should be understood as a device for managing complexity, as it governs interfaces, interdependencies between layers, and replacement cycles – conditions necessary to ensure maintainability and adaptability over time (Manni and Valzano, 2023).

When circularity objectives are introduced, construction-site scalability does not automatically align with life-cycle sustainability: applying circular economy metrics in the built environment requires consistency across design, supply chain, and end-of-life scenarios (Pomponi and Moncaster, 2017). In this sense, DfD emerges as a prerequisite for enabling selective replacement and reverse logistics (Salama, 2017), requiring decision-support evaluation systems capable of measuring the reuse potential of components from the design phase (Paganin et alii, 2024). LCA studies on DfD strategies further show that benefits depend on assumptions regarding service life and realistic scenarios, imposing rigorous methodological transparency (Roberts et alii, 2023; Rasmussen, Birkved and Birgisdóttir, 2019).

The adoption of bio-based materials in prefabricated systems introduces an additional critical variable: climate performance depends not only on the biogenic content but also on the temporal distribution of emissions. Modelling retrofit systems as carbon sinks highlights that rapidly renewable biomass, such as rice straw, can offer significant advantages. However, these are conditioned by timing and end-of-life scenarios (Pittau et alii, 2019). Consistently, Thiébat et alii (2025) emphasise that the sustainability of natural fibres requires integrated assessments; similarly, approaches combining Environmental LCA and Social LCA show that low-emission design cannot be limited to CO_2 reduction alone, but must also consider social and supply chain implications – especially when product innovations and end-of-life strategies affect accessibility, costs, and the replicability of solutions (Palumbo et alii, 2025).

Applications of DLCA further make explicit that landfill scenarios may delay methane emissions, while energy recovery can significantly alter the results (Göswein et alii, 2020). The methodological issue is that a static LCA aggregates emission flows over time. In contrast, DLCA enables the interpretation of annual emission profiles (Levasseur et alii, 2010, 2013), integrating analytical frameworks that are explicit in temporal terms and capable of ad-

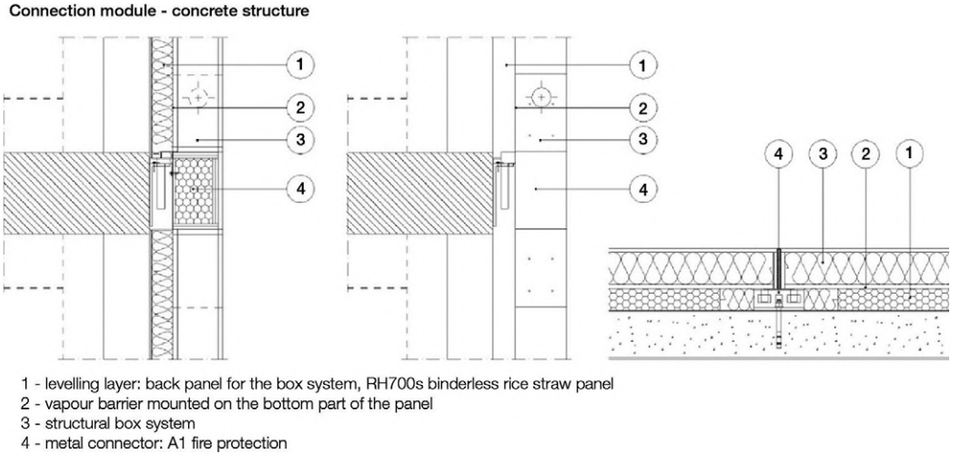


Fig. 8 | Interfaces and joints of the system (credit: the Authors, 2026).

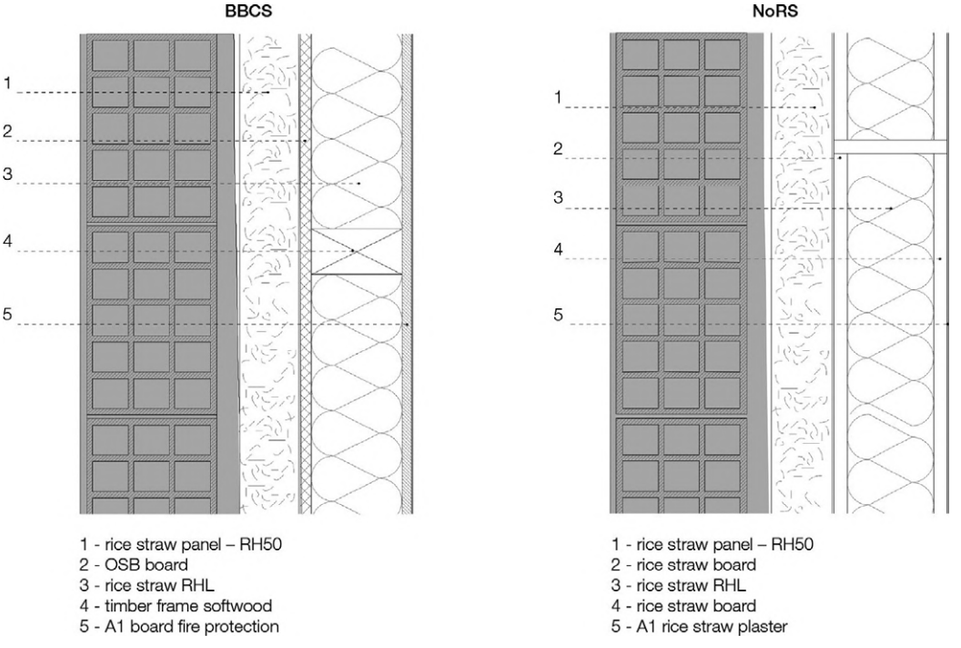


Fig. 9 | Comparative stratigraphy of the two retrofit systems: BBCS vs NoRS (credit: the Authors, 2026).



Fig. 10 | Temporal scheme of the DLCA: 100-year time horizon, biomass regeneration times (rice straw and timber), and envelope replacement scenarios (credit: the Authors, 2026).

Material waste category	Disposal scenario DS1 Landfill	Disposal scenario DS2 Incineration with energy recovery
No potential	inert landfill	inert landfill
Fast composting	sanitary landfill	composting facility
Wood	sanitary landfill	municipal incineration

Tab. 3 | Alternative end-of-life scenarios: DS1 vs DS2 (credit: the Authors, 2026).

dressing the complexity of impacts on the biosphere (Lueddeckens, Saling and Guenther, 2020; Müller et alii, 2025; Sposito and De Giovanni, 2023). In summary, the state of the art highlights an operational gap: the challenge is not only to develop new off-site prefabrication or bio-based technologies, but also to integrate them into a replicable framework that connects processes, circularity, and temporal metrics to support comparable, scalable design decisions.

Methodology | This study aims to assess the climate impact profile over the life cycle of the NoRS, comparing it with that of a biogenic reference system (BBCS), and does so by pursuing three objectives: 1) to ensure comparability and transparency of design choices through the explicit definition of model assumptions; 2) to verify to what extent a dynamic temporal interpretation modifies the understanding of results compared to a conventional LCA; 3) to identify the critical factors affecting the robustness of results, with particular attention to end-of-life scenarios, electricity mix, transport, and replacement frequency. The BBCS is adopted as a timber-based reference system, as it represents a solution comparable in terms of function, non-load-bearing configuration, thermal performance, fire safety requirements, and reference service life; this allows for a clearer isolation of the effects related to differences in material composition and in the temporal dynamics of biogenic carbon, avoiding distortions in comparison due to non-relevant performance differences.

To ensure consistent comparison, NoRS and BBCS were aligned on thermal performance by assuming a steady-state thermal transmittance of $U = 0.19\ W/m^2K$. They were made comparable with respect to fire safety requirements by integrating, for both systems, an external protective layer classified as A1, as well as an equivalent performance level for comparison purposes. The analysis focuses on the embodied impacts of the building envelope system, considering the phases of production, logistics, replacement, and end-of-life (A1–A5, B4, C1–C4, and D), and excludes the operational energy of the building (B6) in order to isolate the effects of supply chain strategies and the temporal dynamics of biogenic carbon storage (Fig. 3).

This approach enables not only environmental comparisons between retrofit alternatives but also a critical assessment of innovation in construction processes, accessibility of interventions, and responsible resource management across the life cycle. In this sense, the study is situated within the framework of integrated environmental assessment approaches, which can overcome a purely static interpretation of carbon (Sposito and De Giovanni, 2023).

Operational phases of the research | The research activities were structured into six operational phases, explicitly defined to ensure the replicability of the process: Phase 1) review of the state of the art and selection of comparative case studies; Phase 2) definition of the Functional Unit (FU) and system boundaries; Phase 3) development of the comparative inventory of the two systems; Phase 4) LCA and DLCA modelling; Phase 5) sensitivity analysis on the main critical parameters; Phase 6) comparative interpretation of results and verification of process transferability.

NoRS: system, process, and interfaces | The NoRS system is configured as a kit of prefabricated bio-based components designed according to DfMA and DfD principles (Fig. 4). Within this framework, on-site variability is reduced through a component-based system and the codification of interfaces. Installation is therefore conceived as a repeatable process based on dry assembly, compatible with distributed production and the transport of flat components. In this context, modularity does not act solely as a criterion for simplifying execution, but also as a technical device for managing maintainability and differentiated replacement cycles of functional layers (Manni and Valzano, 2023).

The basic NoRS module is a non-load-bearing element whose stratigraphy (Fig. 5) has been developed to integrate thermal performance, light prefabrication, and circularity potential. The system includes: a) a compressible levelling and compensation layer based on straw (RH-50, Ricehouse S.r.l.) to absorb irregularities of the existing wall substrate; b) high-density rice straw fibre panels (RH700-s, Ricehouse S.r.l.), serving as stiffening elements and enclosure of the box; c) functional membranes for controlling vapour diffusion; d) primary insulation in loose straw fibre (RH-L, Ricehouse S.r.l.); e) an external layer for mechanical protection and finishing, consisting of plaster with fire resistance class A1 (RH210, Ricehouse S.r.l.).

The use of agricultural by-products further enhances a short supply chain, with potential benefits in terms of reducing transport distances. NoRS adopts a material simplification strategy based on the predominant use of components derived from rice production by-products. While not strictly a mono-material system, this approach reduces the envelope's compositional complexity. It makes its implications regarding LCA, selective replacement, and end-of-life more legible, in line with recent studies on low-material-heterogeneity envelopes (Bucklin et alii, 2023).

The DfMA process follows a structured workflow from design to assembly: definition of panels and tolerances; generation of components and preparation of interfaces; CNC production and component labelling; logistics of flat components; and dry on-site assembly (Fig. 6). Digital fabrication enables error reduction, minimisation of waste, and verification of the assembly sequence. The objective is not centralised mass production, but light prefabrication compatible with distributed production networks, provided that dimensional requirements and quality controls are met.

To respond to the morphological variability of the existing building stock, NoRS adopts a parametric modular strategy articulated across three scales (S, M, and L) and three functional families (Fig. 7): planar modules for opaque surfaces, corner modules for edge management, and integrated modules for windows and service cavities.

The system's interface rules, which constitute the technical foundation of the kits reversibility and transferability, are organised into three levels: 1) joints within the box system, related to the precision and cutting tolerances of CNC fabrication; 2) joints between adjacent modules, responsible for hygrothermal continuity and for ensuring airtightness and watertightness; 3) connections between the system and the existing structure, realised through metal plates that enable load transfer and the absorption of substrate tolerances. Within this framework, maintenance and selective replacement are considered integral parts of the system's life cycle. The central interface element is a multifunctional mechanical connector, developed within the scope of a patent application[5], positioned along horizontal joints and designed to integrate assembly, load transfer, and fire compartmentation, also acting as a fire barrier (Fig. 8). This component mediates the transition between the precision of digital fabrication and the tolerances of the existing building, enabling dry installation, self-alignment, and selective replacement of modules in accordance with DfD principles.

NoRS is presented as a system demonstrator rather than as an already certified product. The process, therefore, identifies the performance requirements to be verified during the transition towards industrial application: hygrothermal behaviour of junctions under dynamic conditions; airtightness and watertightness of mechanical joints; durability of natural fibres under variable humidity conditions; fire performance of the assembly; acoustic performance; and long-term reliability of interfaces. In this paper, these aspects are not assumed to be already compliant; rather, they are identified as verification conditions necessary for the transition from demonstrator to product, distinguishing between methodological-comparative feasibility and the pathway towards regulatory compliance.

Functional unit and system boundaries | The comparison is based on a Functional Unit (FU) defined as 1 square metre of façade retrofit system with a Reference Service Life (RSL) of 60 years (Tab. 1). The scope of the assessment follows the modular structure of the NoRS kit. It includes: raw material supply and production (A1–A3), transport and installation (A4–A5), scheduled replacement of components with shorter service life (B4), end-of-life processes (C1–C4), and net benefits beyond the system boundaries (D). The methodological framework follows the standards UNI EN ISO 14040:2021 (UNI, 2021b), UNI EN ISO 14044:2021 (UNI, 2021c), UNI EN 15804:2021 (UNI, 2021a), and UNI EN 15978:2011 (UNI, 2011). Layers that do not differentiate between the two solutions were excluded through an explicit rule (mass < 1%), applied symmetrically.

Inventory, data sources, and scenarios | The processes related to materials, energy, and transport were modelled by integrating standard LCA databases (Ecoinvent 3.10) with literature data. At the same time, technical datasheets provided by Ricehouse S.r.l. were used to define the physical and performance characteristics of the rice straw fibre components. The comparison between NoRS and BBCS is based on a detailed inventory of layer compositions and masses per Functional Unit (Fig. 9; Tab. 2). During the use phase, the model includes a replacement event at year 30 for functional layers with a service life shorter than the RSL (B4). At the same time, the main components maintain an Estimated Service Life (ESL) of 60 years. For end-of-life, two alternative scenarios were defined: DS1, characterised by the predominance of disposal in sanitary landfill, and DS2, oriented towards energy recovery and controlled biomass treatment (Tab. 3). The objective is not to identify an 'optimal' scenario, but to make explicit the dependence of results on end-of-life (EoL) supply chains and on delayed methane emissions associated with the anaerobic degradation of biogenic materials.

The construction of scenarios DS1 and DS2 is anchored to the Italian regulatory context. Bio-based construction materials, such as rice straw and timber, and controlled end-of-life supply chains (e.g. composting and energy recovery) are not yet systematically established, making DS1 (sanitary landfill) the most realistic reference scenario for the share of biomass not intercepted by specialised treatment chains. Conversely, DS2 represents the trajectory towards which European policies are directing the sector, in line with Directive 2008/98/EC (European Parliament and Council of the European Union, 2008) and with the objectives of the EPBD (European Union, 2024). The two scenarios are therefore not probabilistic in nature, but comparative and normative: DS1 describes current, more conservative conditions, while DS2 represents enabling conditions for achieving full climate benefits.

DLCA and temporal indicators | Alongside conventional LCA, the study applies a DLCA methodology (Fig. 10). The modelling adopts an explicit temporal approach, based on the annual distribution of emission and uptake flows over a 100-year horizon, in order to make visible the different timing between initial emissions, in-use replacements, and biomass regeneration processes. Delayed methane emissions associated with end-of-life sce-

Samples	Materials	Density	s	λ	U	Rt	ma	C-storage	CO_2 bio		R	CO_2 uptake
		[kg/m³]	[m]	[W/mK]	[W/m²K]	[m²K/W]	[kg/m²]	[kgC/kg]	[$kgCO_2$/kg]	[$kgCO_2$/m²]	[year]	[$kgCO_2$/a]
BBCS	wood	500	0.03	0.04	0.2	5	13.50	0.404	1.48	20	90	-0.22
	ricestraw	150		0.051	0.2	5	18.75	0.368	1.35	25	1	-25.32
NoRS	ricestraw	150		0.051	0.2	5	64.55	0.368	1.35	87	1	-87.18

Tab. 4 | Biogenic CO_2 uptake: BBCS vs NoRS (credit: the Authors, 2026).

	BBCS				NoRS			
	[$kgCO_2$]	[kgCO]	[$kgCH_4$]	[$kgNO_2$]	[$kgCO_2$]	[kgCO]	[$kgCH_4$]	[$kgNO_2$]
A1-A2 | Material production – Transport	26.16	0.14	0.14	0.0022	11.9	0.12	0.28	0.0012
A3 | Manufacturing	2.72	0.0008	0.0041	0	2.3	0.0002	0.0043	0
A4-A5 | Transport – Construction installation process	2.67	0.0067	0.14	0	2.3	0.0036	0.28	0
B1 | Regrow biomass straw	–	–	–	–	-87.18	–	–	–
B1 | Regrow biomass timber	-25.32	–	–	–	–	–	–	–
B4 | Replacement	12.08	0.02	0.08	0.008	9.94	0.02	0.11	0.0045
DS1 | Disposal scenario Landfill	28.63	0.25	8.57	0.0004	14.35	0.35	12.06	0.0004
DS2 | Disposal scenario Incineration / Energy recovery	-2.41	-0.0019	-0.55	-0.0003	-4.45	-0.018	-1.12	-0.0004

Tab. 5 | Inventory of emissions and removals by life cycle module: BBCS vs NoRS (credit: the Authors, 2026).

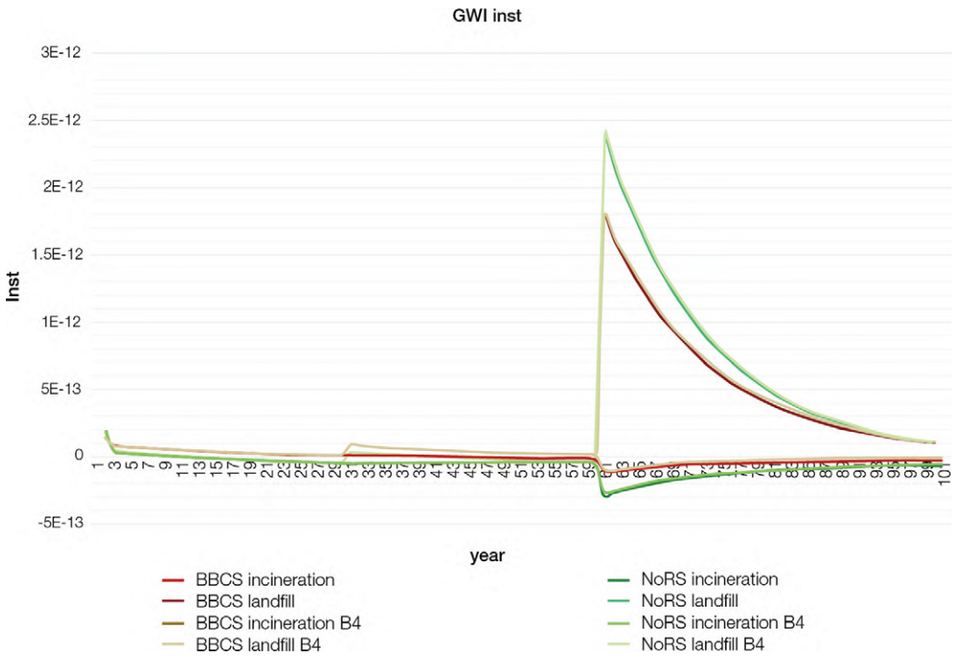


Fig. 11 | Instantaneous radiative forcing (GWI inst) in scenarios DS1 and DS2 for BBCS and NoRS, including phase B4 (credit: the Authors, 2026).

narios are treated as time-dependent flows, consistent with the assumptions of anaerobic degradation or energy recovery adopted in scenarios DS1 and DS2. The model combines inventory data from standard databases and the literature, structured within a comparative LCA/DLCA procedure to produce instantaneous and cumulative emission profiles, as well as synthetic indicators useful for comparing retrofit alternatives. In the DS1 scenario, biogenic methane released from a sanitary landfill is modelled as a delayed emission associated with the anaerobic degradation of biomass; in the DS2 scenario, controlled biomass treatment and energy recovery from timber are modelled as alternative pathways that can reduce net emissions and generate energy credits in Module D.

LCA modelling was carried out using PRé Consultants SimaPro 9.6.0.1. DLCA calculations were performed using the DynCO_2 tool (CIRAIG, Université de Montréal), which provides instantaneous (GWI inst) and cumulative (GWI cum) radiative forcing profiles in W/m^2, as well as relative impact expressed in CO_2eq (GWP), following the formulation of Levasseur et alii (2010; 2013). The flows of CO_2, CH_4, CO, and N_2O are treated separately, distinguishing fossil, biogenic, and land-use change contributions, in line with the approach of Göswein et alii (2020). In the model, biomass regeneration times are assumed to be 1 year for rice straw and 90 years for timber. In addition to instantaneous and cumulative emission profiles, synthetic indicators such as time-to-zero and time-to-negative are calculated, useful respectively for describing the time required to neutralise initial emission impulses and the point at which the system becomes a net carbon sink (Levasseur et alii, 2013; Müller et alii, 2025).

Sensitivity analysis and replicability | The sensitivity analysis is structured around four main driving factors: 1) variation in end-of-life scenarios (DS1 vs DS2); 2) influence of the electricity mix on the calculation of credits in Module D; 3) impact of transport distances and logistics; 4) variation in service life and replacement rates of components. This approach is consistent with the scientific debate on sensitivity to temporal parameters (Shimako et alii, 2018). The combination of processes derived from standard databases and primary data enables a methodologically transparent and replicable comparison, grounded in the systematisation of the inventory and the explicit definition of model assumptions (Brandão et alii, 2013; Müller et alii, 2025).

Results | The analysis of results is structured across four levels: emission inventories by life-cycle modules, instantaneous radiative forcing profiles, cumulative radiative forcing profiles, and synthetic indicators of relative impact. The DLCA results show that explicitly accounting for the temporal dimension substantially modifies the interpretation of bio-based retrofit, making visible both the processes of biomass uptake and regeneration and the effects of end-of-life, particularly delayed methane emissions in landfill scenarios. In the model, emission and uptake flows are distributed along an annual timeline and returned as instantaneous and cumulative radiative forcing profiles over a 100-year horizon, including in-use replacements (B4) and the two end-of-life scenarios, DS1 and DS2 (Levasseur et alii, 2010, 2013). Input emission and uptake quantities are reported by life cycle modules as inventory data and as parameters for biogenic absorption and storage (Tab. 4).

The aggregated inventory by modules (Tab. 5) shows that, in both alternatives, DS1 (landfill) is one of the most impactful contributors: this high impact is due to methane emissions associated with the degradation of biogenic materials in the sanitary landfill. The difference between the two systems is mainly related to the quantity and type of biomass used: a higher share of rice straw in the demonstrator reduces the overall fossil contribution in some phases, but increases sensitivity to methane emissions if end-of-life is not managed through controlled supply chains. At the same time, absorption parameters reveal the temporal divergence between rapidly regenerating biomass (straw with annual rotation) and slowly regenerating biomass (timber with a 90-year rotation). This condition directly affects the dynamic profile (Lueddeckens, Saling and Guenther, 2020). The instantaneous radiative forcing profile shows a rapid reduction in impact as early as the first year, associated with crop regeneration. In the case of NoRS, the curve drops below zero: the higher share of biogenic biomass allows for faster compensation of initial emissions (Fig. 11). The replacement event at 30 years (B4) produces a punctual increase, consistent with the renewal of shorter-life layers; no scheduled replacement is assumed for the main biogenic components. At the end of life, under scenario DS1, a marked increase in radiative forcing is observed due to the decomposition of biogenic materials in a sanitary landfill. The model considers approximately 60 kg of straw for NoRS, compared to about 20 kg of straw and 14 kg of timber for BBCS; returning to near-zero values requires approximately 30 years after EoL. This dynamic is consistent with previous DLCA applications on straw-based retrofit systems (Göswein et alii, 2020).

The cumulative radiative forcing profile (Fig. 12) confirms that DS1 has the greatest impact on both alternatives: methane release from landfills leads to a rapid increase in the curve, reducing or even cancelling part of the benefit associated with temporary carbon storage. In DS2, the profiles improve significantly and can reach negative values, highlighting that climate neutrality is not an intrinsic property of the material, but depends on modelling assumptions and on the consistency of end-of-life supply chains with the design strategy (Brandão et alii, 2013; Müller et alii, 2025). In the comparison between NoRS and BBCS, the different timing of biomass regeneration emerges as a key discriminating factor.

Finally, the interpretation in terms of relative impact further synthesises the results: NoRS shows the lowest impact and reaches negative conditions earlier than the timber-based reference system. BBCS cannot be automatically considered climate-neutral, as carbon storage in timber does not in it-

self offset emissions over the life cycle if regrowth is slow and/or if end-of-life leads to significant emissions (Fig. 13). By converting cumulative radiative forcing into equivalent metrics and analysing synthetic temporal indicators, the model shows that GWP becomes negative after approximately 25 years for NoRS and after approximately 58 years for BBCS. This difference highlights that a significant climate benefit is achieved only when biomass resources rapidly reabsorb carbon and when end-of-life processes limit methane emissions. Overall, the results confirm the need to make scenarios explicit and to conduct sensitivity analyses on critical factors, including end-of-life, Module D credits, transport, and replacement cycles (Shimako et alii, 2018).

Relationship with the SDGs: critical mapping | The four SDGs directly relevant to the study are: SDG 9 (Industry, Innovation and Infrastructure) is the central one: the proposed model integrates digital fabrication, light prefabrication, and temporal metrics into an industrialisable approach for building envelope retrofit, contributing to innovation in construction processes and to the scalability of solutions. SDG 11 (Sustainable Cities and Communities) is addressed through the system's ability to intervene on occupied buildings, reducing construction time and occupant disruption, with positive implications for the resilience of vulnerable urban communities. SDG 12 (Responsible Consumption and Production) is pursued through the DfD logic and the short supply chain for rice straw, which is oriented towards low-impact production and consumption models and towards selective component replacement rather than demolition. SDG 13 (Climate Action) is addressed through the reduction of embodied carbon and the temporal management of climate-related flows across the life cycle, to contribute to the decarbonisation of the building stock.

The indirectly affected SDGs include SDG 7 (Affordable and Clean Energy), as improvements to the building envelope reduce operational energy consumption and may help mitigate energy poverty, and SDG 8 (Decent Work and Economic Growth), as the distributed production model can generate qualified local employment. SDG 15 (Life on Land) is indirectly involved through the use of rapidly renewable agricultural biomass as an alternative to extractive materials, with potential benefits for soil management.

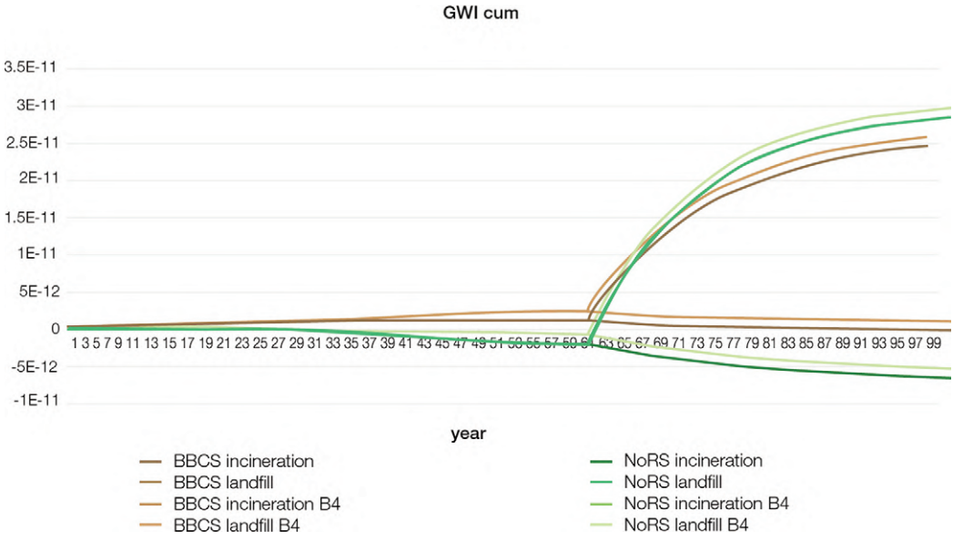
However, several trade-offs emerge. With SDG 1 (No Poverty) and SDG 10 (Reduced Inequalities), the main issue concerns the initial costs of the system, which may be unaffordable for more vulnerable population groups in the absence of incentive policies and supply chain governance. With SDG 12, a conflict exists between energy recovery and material reuse at end-of-life: scenario DS2 reduces methane emissions through controlled incineration but precludes component reuse. With SDG 13, the trade-off concerns the dependence of climate benefits on the consistency of end-of-life supply chains. In the absence of controlled infrastructures, scenario DS1 shows that delayed methane emissions may offset the advantages of biogenic carbon storage.

Discussion and limitations of the study | The introduction of temporal metrics through DLCA shifts environmental assessment from a retrospective reading to a decision-support tool, as the analysis concerns not only the magnitude of impacts but also their temporal distribution. In this way, the interpretation of results does not merely assess the robustness of environmental comparisons but also enables a critical understanding of how different supply chain and end-of-life choices generate synergies or trade-offs in relation to objectives of innovation, equity, material responsibility, and climate mitigation.

DLCA enables the interpretation of climate change trajectories throughout the building life cycle, making explicit emission profiles and temporal compensations that conventional LCA tends to compress into a single indicator (Negishi et alii, 2019). The approach presented here addresses temporal criticalities, recognised as a structural limitation of static LCA and particularly relevant for bio-based materials (Lueddeckens, Saling and Guenther, 2020), in line with the most recent temporally explicit analytical frameworks (Müller et alii, 2025). The increasing availability of operational procedures for DLCA and the temporalisation of background processes make its application more feasible in operational contexts (Cardellini et alii, 2018; Pigné et alii, 2020), as confirmed by the literature in the built environment (Su et alii, 2021).

The application of DLCA to the NoRS system makes visible what static LCA tends to flatten: the 33-year difference in achieving negative GWP between NoRS and BBCS is not a mere technical detail, but a result with significant design implications. A supply chain choice – rice straw with annual regeneration versus timber with a 90-year rotation – can determine whether a system contributes to climate mitigation within a timeframe consistent with the 2050 targets, or beyond that horizon.

If the methodological transferability of the method is high – thanks to functional units, EN 15804 system boundaries, scenarios, and sensitivity analyses – the maturity of the NoRS system as a product remains constrained by the need for extensive performance verification, particularly regarding fire safety, the hygrothermal behaviour of junctions, joint tightness, and durability. In this sense, the re-



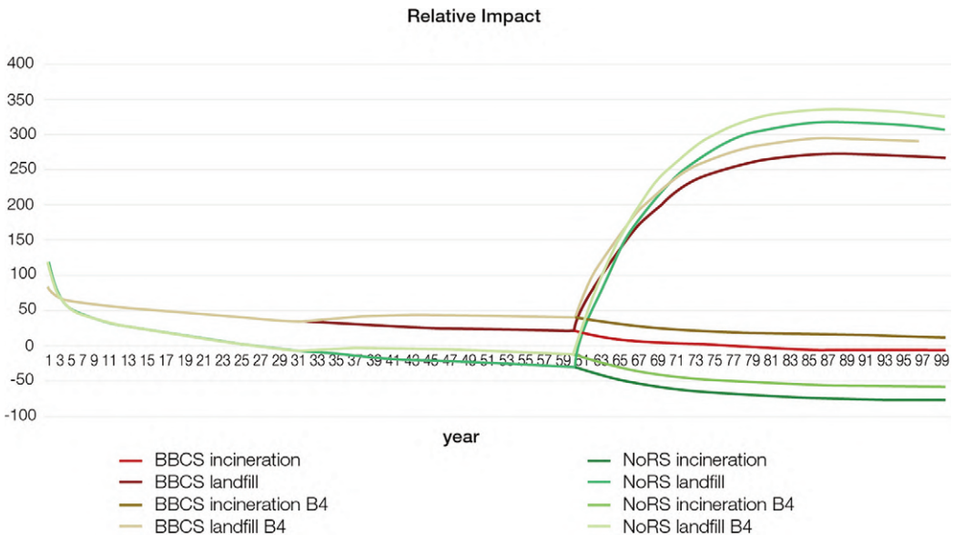


Fig. 12 | Cumulative radiative forcing (GWI cum) in scenarios DS1 and DS2 for BBCS and NoRS, including phase B4 (credit: the Authors, 2026).

Fig. 13 | Relative impact (GWI) in scenarios DS1 and DS2 for BBCS and NoRS, including phase B4 (credit: the Authors, 2026).

sults constitute a demonstration of methodological-comparative feasibility rather than a system certification. The design of the mechanical connector addresses the crucial issue of interfaces, which the literature identifies as a main barrier to effective circularity (Salama, 2017). However, disassembly and selective replacement require not only geometric compatibility, but also reverse logistics and end-of-life management. Within this framework, one of the key findings of the DLCA concerns the sensitivity of results to delayed methane emissions in landfills, which can reduce or even negate the benefits of temporary carbon storage: controlled end-of-life scenarios therefore become an enabling condition, not merely a modelling detail.

For a correct interpretation of the results, it is also necessary to distinguish three categories of limitations. At the data level, the characterisation of rice straw-based materials relies partly on technical datasheets provided by the manufacturer. At the same time, background data are sourced from standard databases (Ecoinvent 3.10) and may not fully reflect the specificities of the Italian supply chain. At the modelling level, the DS1 and DS2 end-of-life scenarios represent plausible but not exhaustive trajectories of real-world supply chains, and the absence of an S-LCA assessment leaves the social dimension of impacts only partially explored. The integration of S-LCA metrics would make the social dimension of retrofit more explicit, linking embodied carbon to equity indicators for vulnerable communities (Palumbo et alii, 2025). Finally, logistics simulation at the district scale represents the next operational frontier, where the coherence among design, supply chain, and public policy can be empirically tested.

From a performance perspective, several aspects of the NoRS system have not yet been experimentally verified: the hygrothermal behaviour of junctions under dynamic conditions; the air- and watertightness of mechanical joints; the durability of natural fibres under variable humidity conditions; the fire performance of the assembly; and the acoustic performance.

Barriers to diffusion operate at multiple levels. Technical and regulatory barriers include the lack of standardised classifications for biogenic construction waste and an Environmental Product Declaration (EPD) for rice straw-based materials, which hinder their integration into public specifications and procurement processes. Economic barriers include higher initial costs compared to conventional solutions and the difficulty of economically valuing the deferred benefits of biogenic carbon storage over the life cycle. Organisational barriers arise from the need to coordinate distributed supply chains in the absence of established service models for bio-based retrofit at an industrial scale. End-of-life barriers are among the most critical: the lack of infrastructure for composting or controlled energy recovery of biogenic construction materials risks undermining the benefits of temporary carbon storage, as highlighted by scenario DS1.

From the perspective of transferability, the methodological framework – normalised functional unit, EN 15804 system boundaries, comparative end-of-life scenarios, and synthetic temporal indicators – applies to any building envelope retrofit system, regardless of technology, material, or place of use, provided that adequate inventory data are available and that end-of-life scenarios are defined with comparable transparency. The framework is also potentially applicable to other disciplinary fields addressing the assessment of bio-based construction systems.

In summary, the NoRS case shows that the climate benefits of bio-based materials depend on conditions beyond the material choice itself, including supply chain management, assessment tools, and the regulatory framework. Making these conditions explicit and measurable represents one of the most productive directions for research on sustainable retrofit in the coming years.

Acknowledgements

This contribution originates from the PhD research entitled 'Built by nature: robotic additive manufacturing process for biobased component towards a carbon-neutral retrofit of the existing building stock', conducted by G. Castellano at the Department of Architecture, Built Environment and Construction Engineering (ABC), Politecnico di Milano (Italy), within the Material Balance research group. The PhD was funded by the National Operational Programme (PON) Research and Innovation 2014-2020, MUR Decree no. 1061 of 18/08/2021, on green and innovation topics (37th cycle, years 2021-2024); it has been completed.

Ricehouse S.r.l. provided the product technical datasheets used to define the inventory parameters; the LCA modelling data derive from standard databases and scientific literature sources. The company also supported the construction of the physical demonstrator. The patent for industrial invention no. 102025000008328 was filed on 15/04/2025 at the Italian Patent and Trademark Office.

Regarding the attribution of individual contributions: G. Castellano conducted the entire doctoral research and is responsible for the methodological work, the NoRS system, the LCA and DLCA modelling, and the comparative analysis; F. Pittau supervised the LCA and DLCA modelling and interpretation; I. M. Paoletti carried out overall scientific supervision; L. E. Malighetti contributed to retrofit-related topics and case studies; F. Pradella contributed to DfMA strategies and digital fabrication solutions. The Authors declare no conflicts of interest.

Notes

1) For further information, see: energiesprong.org [Accessed 6 April 2026].

2) For further information, see: cordis.europa.eu/project/id/723829 [Accessed 6 April 2026].

3) For further information, see: cordis.europa.eu/project/id/636984 [Accessed 6 April 2026].

4) For further information, see: cordis.europa.eu/project/id/285540 [Accessed 6 April 2026].

5) For further information, see: re.public.polimi.it/handle/11311/1289207 [Accessed 6 April 2026].

References

Alvarez-Alava, I., Elguezabal, P., Jorge, N., Armijos-Moya, T. and Konstantinou, T. (2023), "Definition and design of a prefabricated and modular façade system to incorporate solar harvesting technologies", in *Journal of Facade Design and Engineering*, vol. 11, issue 2, pp. 1-8. [Online] Available at: doi.org/10.47982/jfde.2023.2.T1 [Accessed 6 April 2026].

Brandão, M., Levasseur, A., Kirschbaum, M. U. F., Weidema, B. P., Cowie, A. L., Jørgensen, S. V., Hauschild, M. Z., Pennington, D. W. and Chomkhamsri, K. (2013), "Key issues and options in accounting for carbon sequestration and temporary storage in life cycle assessment and carbon footprinting", in *The International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 18, issue 1, pp. 230-240. [Online] Available at: doi.org/10.1007/s11367-012-0451-6 [Accessed 6 April 2026].

Bucklin, O., Di Bari, R., Amtsberg, F. and Menges, A. (2023), "Environmental Impact of a Mono-Material Timber Building Envelope with Enhanced Energy Performance", in *Sustainability*, vol. 15, issue 1, article 556, pp. 1-20. [Online] Available at: doi.org/10.3390/su15010556 [Accessed 6 April 2026].

Callegaro, N. and Albatici, R. (2023), "Energy retrofit with prefabricated timber-based façade modules – Pre- and post-comparison between two identical buildings", in *Journal of Facade Design and Engineering*, vol. 11, issue 1, pp. 1-18. [Online] Available at: doi.org/10.47982/jfde.2023.1.01 [Accessed 6 April 2026].

Capasso, M. C. (2025), "LCA e domanda energetica complessiva dei prodotti edili in canapa | LCA and cumulative energy demand of hemp buildings products", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 18, pp. 276-293. [Online] Available at: doi.org/10.69143/2464-9309/18162025 [Accessed 6 April 2026].

Cardellini, G., Mutel, C. L., Vial, E. and Muys, B. (2018), "Temporalis, a generic method and tool for dynamic Life Cycle Assessment", in *Science of the Total Environment*, vol. 645, pp. 585-595. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.07.044 [Accessed 6 April 2026].

Clemente, C., Mancini, F., Mangiatordi, A. and Zagaria, M. (2024), "Riqualificazione e decarbonizzazione di edifici scolastici – Il CIS Roma Scuole Verdi | Deep renovation and decarbonisation of school buildings – The CIS Roma Scuole Verdi", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 15, pp. 204-215. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/15162024 [Accessed 6 April 2026].

European Commission (2020), *Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions – A Renovation Wave for Europe – Greening our buildings, creating jobs, improving lives*, document 52020DC0662, COM/2020/662 final. [Online] Available at: eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=COM:2020:662:FIN [Accessed 6 April 2026].

European Parliament and Council of the European Union (2008), *Directive 2008/98/EC of the European Parliament and of the Council of 19 November 2008 on waste and repealing certain Directives (Text with EEA relevance)*, doc-

ument 32008L0098. [Online] Available at: data.europa.eu/eli/dir/2008/98/oj [Accessed 6 April 2026].

European Union (2024), *Directive (EU) 2024/1275 of the European Parliament and of the Council on the energy performance of buildings*, document 32024L1275. [Online] Available at: data.europa.eu/eli/dir/2024/1275/oj [Accessed 6 April 2026].

Göswein, V., Pittau, F., Silvestre, J. D. D., Freire, F. and Habert, G. (2020), "Dynamic life cycle assessment of straw-based renovation – A case study from a Portuguese neighbourhood", in *IOP Conference Series | Earth and Environmental Science*, vol. 588, issue 4, article 042054, pp. 1-8. [Online] Available at: doi.org/10.1088/1755-1315/588/4/042054 [Accessed 6 April 2026].

Habert, G., Röck, M., Steininger, K., Lupisek, A., Birgisdottir, H., Desing, H., Chandrakumar, C., Pittau, F., Passer, A., Rovers, R., Slavkovic, K., Hollberg, A., Hoxha, E., Jusselme, T., Nault, E., Allacker, K. and Lützkendorf, T. (2020), "Carbon budgets for buildings – Harmonizing temporal, spatial and sectoral dimensions", in *Buildings and Cities*, vol. 1, issue 1, pp. 429-452. [Online] Available at: doi.org/10.5334/bc.47 [Accessed 6 April 2026].

Lauria, M., Azzalin, M., Giglio, F. and La Face, G. M. (2025), "Efficienza energetica e smartness degli edifici nelle politiche ambientali pubbliche | Energy efficiency and smart buildings in public environmental policies", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 18, pp. 264-275. [Online] Available at: doi.org/10.69143/2464-9309/18152025 [Accessed 6 April 2026].

Levasseur, A., Lesage, P., Margni, M. and Samson, R. (2013), "Biogenic Carbon and Temporary Storage Addressed with Dynamic Life Cycle Assessment", in *Journal of Industrial Ecology*, vol. 17, issue 1, pp. 117-128. [Online] Available at: doi.org/10.1111/j.1530-9290.2012.00503.x [Accessed 6 April 2026].

Levasseur, A., Lesage, P., Margni, M., Deschênes, L. and Samson, R. (2010), "Considering time in LCA – Dynamic LCA and its application to global warming impact assessments", in *Environmental Science & Technology*, vol. 44, issue 8, pp. 3169-3174. [Online] Available at: doi.org/10.1021/es9030003 [Accessed 6 April 2026].

Lueddeckens, S., Saling, P. and Guenther, E. (2020), "Temporal issues in life cycle assessment – A systematic review", in *The International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 25, issue 8, pp. 1385-1401. [Online] Available at: doi.org/10.1007/s11367-020-01757-1 [Accessed 6 April 2026].

Manni, V. and Valzano, L. S. (2023), "Modularità e architettura adattiva – Una strategia per la gestione di sistemi d'involucro complessi | Modularity and adaptive architecture – A strategy for managing complex envelope systems", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 14, pp. 134-151. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/14112023 [Accessed 6 April 2026].

Müller, A., Diepers, T., Jakobs, A., Cardellini, G., von der Assen, N., Guinée, J. and Steubing, B. (2025), "Time-explicit life cycle assessment – A flexible framework for coherent consideration of temporal dynamics", in *The International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 30, issue 10, pp. 3052-3071. [Online] Available at: doi.org/10.1007/s11367-025-02539-3 [Accessed 6 April 2026].

Negishi, K., Lebert, A., Almeida, D., Chevalier, J. and Tiruta-Barna, L. (2019), "Evaluating climate change pathways through a building's lifecycle based on Dynamic Life Cycle Assessment", in *Building and Environment*, vol. 164, article 106377, pp. 1-16. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106377 [Accessed 6 April 2026].

Osservatorio Italiano Povertà Energetica (2025), *La povertà energetica in Italia nel 2024*. [Online] Available at: oipeosservatorio.it/wp-content/uploads/2025/12/2025_PE_ITA_2024.pdf [Accessed 6 April 2026].

Paganin, G., Talamo, C., Atta, N. and Tinelli, E. (2024), "Riuso di componenti edilizi – Sistema di valutazione a supporto delle decisioni negli interventi di ridistribuzione interna | Reuse of building components – Assessment system to support decisions in indoor re-layout interventions", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 15, pp. 266-275. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/15212024 [Accessed 6 April 2026].

Palumbo, E., Mazzei, I., Perpetua, M. and Pomponi, F. (2025), "Impatti ambientali e sociali nel ciclo vita per una progettazione a basso carbonio | Environmental and social life cycle for low-carbon design", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 18, pp. 294-303. [Online] Available at: doi.org/10.69143/2464-9309/18172025 [Accessed 6 April 2026].

Peñaloza, D., Erlandsson, M. and Falk, A. (2016), "Exploring the climate impact effects of increased use of bio-based materials in buildings", in *Construction and Building Materials*, vol. 125, pp. 219-226. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.08.041 [Accessed 6 April 2026].

Pigné, Y., Gutiérrez, T. N., Gibon, T., Schaubroeck, T., Popovici, E., Shimako, A. H., Benetto, E. and Tiruta-Barna, L. (2020), "A tool to operationalize dynamic LCA, including time differentiation on the complete background database", in *The International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 25, issue 11, pp. 267-279. [Online] Available at: doi.org/10.1007/s11367-019-01696-6 [Accessed 6 April 2026].

Pittau, F., Lumia, G., Heeren, N., Iannaccone, G. and Habert, G. (2019), "Retrofit as a carbon sink – The carbon storage potentials of the EU housing stock", in *Journal of Cleaner Production*, vol. 214, pp. 365-376. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.12.304 [Accessed 6 April 2026].

Pittau, F., Malighetti, L. E., Iannaccone, G. and Masera, G. (2017), "Prefabrication as Large-scale Efficient Strategy for the Energy Retrofit of the Housing Stock – An Italian Case Study", in *Procedia Engineering*, vol. 180, pp. 1160-1169. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.276 [Accessed 6 April 2026].

Pomponi, F. and Moncaster, A. (2017), "Circular economy for the built environment – A research framework", in *Journal of Cleaner Production*, vol. 143, pp. 710-718. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.055 [Accessed 6 April 2026].

Priore, Y. D., Delmenico, S., Rinquet, L., Habert, G. and Jusselme, T. (2026), "Potential contribution of biogenic materials in new and renovated buildings towards carbon budgets and storage in Switzerland", in *Journal of Cleaner Production*, vol. 541, article 147558, pp. 1-15. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.jclepro.2026.147558 [Accessed 06 April 2026].

Rasmussen, F. N., Birkved, M. and Birgisdóttir, H. (2019), "Upcycling and Design for Disassembly – LCA of buildings employing circular design strategies", in *IOP Conference Series | Earth and Environmental Science*, vol. 225, article 012040, pp. 1-8. [Online] Available at: doi.org/10.1088/1755-1315/225/1/012040 [Accessed 6 April 2026].

Roberts, M., Allen, S., Clarke, J., Searle, J. and Coley, D. (2023), "Understanding the global warming potential of circular design strategies – Life cycle assessment of a design-for-disassembly building", in *Sustainable Production and Consumption*, vol. 37, pp. 331-343. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.spc.2023.03.001 [Accessed 6 April 2026].

Röck, M., Saade, M. R. M., Balouktsi, M., Rasmussen, F. N., Birgisdóttir, H., Frischknecht, R., Habert, G., Lützkendorf, T. and Passer, A. (2020), "Embodied GHG emissions of buildings – The hidden challenge for effective climate change mitigation", in *Applied Energy*, vol. 258, article 114107, pp. 1-12. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114107 [Accessed 6 April 2026].

Salama, W. (2017), "Design of concrete buildings for disassembly – An explorative review", in *International Journal of Sustainable Built Environment*, vol. 6, issue 2, pp. 617-635. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.ijsbe.2017.03.005 [Accessed 6 April 2026].

Shimako, A. H., Tiruta-Barna, L., Bisinella de Faria, A. B., Ahmadi, A. and Spérandio, M. (2018), "Sensitivity analysis of temporal parameters in a dynamic LCA framework", in *Science of the Total Environment*, vol. 624, pp. 1250-1262. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.12.220 [Accessed 6 April 2026].

Silva, P. C. P., Almeida, M., Bragança, L. and Mesquita, V. (2013), "Development of prefabricated retrofit module towards nearly zero energy buildings", in *Energy and Buildings*, vol. 56, pp. 115-125. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.09.034 [Accessed 6 April 2026].

Sposito, C. and De Giovanni, G. (2023), "Affrontare la complessità – Integrare LCA, ERA ed ESA per valutare impatti e benefici antropici sulla biosfera | Dealing with complexity – Integrating LCA, ERA and ESA to assess human impacts and benefits on the biosphere", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 14, pp. 12-39. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/1412023 [Accessed 6 April 2026].

Su, S., Li, X., Zhu, C., Lu, Y. and Lee, H. W. (2021), "Dynamic Life Cycle Assessment – A review of research for temporal variations in life cycle assessment studies", in *Environmental Engineering Science*, vol. 38, issue 11, pp. 1013-1026. [Online] Available at: doi.org/10.1089/ees.2021.0052 [Accessed 6 April 2026].

Thiébat, F., Masoero, A., Morselli, F., Fregonara, E., Senatore, C., Muñoz Veloza, M. A. and Giordano, R. (2025), "Fibre naturali e circolarità in architettura – Sostenibilità ambientale, economica e sociale | Natural fibres and circularity in architecture – Environmental, economic, and social sustainability", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 18, pp. 316-331. [Online] Available at: doi.org/10.69143/2464-9309/18192025 [Accessed 6 April 2026].

Tushar, Q., Zhang, G., Bhuiyan, M. A., Navaratnam, S., Giustozzi, F. and Hou, L. (2022), "Retrofit of Building Façade Using Precast Sandwich Panel – An Integrated Thermal and Environmental Assessment on BIM-Based LCA", in *Buildings*, vol. 12, issue 12, article 2098, pp. 1-22. [Online] Available at: doi.org/10.3390/buildings12122098 [Accessed 6 April 2026].

UN – United Nations (2015), *Transforming our world – The 2030 Agenda for Sustainable Development – Resolution adopted by the General Assembly on 25 September 2015*, document A/RES/70/1. [Online] Available at: docs.un.org/en/A/res/70/1 [Accessed 6 April 2026].

UNEP – United Nations Environment Programme (2025), *Global Status Report for Buildings and Construction 2024/2025 – Not just another brick in the wall – The solutions exist – Scaling them will build on progress and cut emissions fast*, UNEP, Paris. [Online] Available at: wedocs.unep.org/20.500.11822/47214 [Accessed 6 April 2026].

UNI (2021a), *UNI EN 15804:2021 – Sustainability of construction works – Environmental product declarations – Core rules for the product category of construction products*. [Online] Available at: store.uni.com/en/uni-en-15804-2021 [Accessed 6 April 2026].

UNI (2021b), *UNI EN ISO 14040:2021 – Environmental management – Life Cycle Assessment – Principles and framework*. [Online] Available at: store.uni.com/en/uni-en-iso-14040-2021 [Accessed 6 April 2026].

UNI (2021c), *UNI EN ISO 14044:2021 – Environmental management – Life Cycle Assessment – Requirements and guidelines*. [Online] Available at: store.uni.com/en/uni-en-iso-14044-2021 [Accessed 6 April 2026].

UNI (2011), *UNI EN 15978:2011 – Sustainability of construction works – Assessment of environmental performance of buildings – Calculation method*. [Online] Available at: store.uni.com/en/uni-en-15978-2011 [Accessed 6 April 2026].

van Roosmalen, M., Herrmann, A. and Kumar, A. (2021), "A review of prefabricated self-sufficient facades with integrated decentralized HVAC and renewable energy generation and storage", in *Energy and Buildings*, vol. 248, article 111107, pp. 1-13. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111107 [Accessed 6 April 2026].

ARCHITECTURE
Research & Experimentation

AGATHÓN – International Journal of Architecture, Art and Design | n. 19 | 2026 | pp. 278-293
ISSN print: 2464-9309 – ISSN online: 2532-683X | doi.org/10.69143/2464-9309/19162026

Article Info

Received 10 March 2026
Revised 11 April 2026
Accepted 13 April 2026
Published 30 June 2026

TRASFERIMENTO TECNOLOGICO AUTOMOTIVE-AEC
Framework DfMA e sistemi di facciata complessi

AUTOMOTIVE-AEC TECHNOLOGY TRANSFER
DfMA framework and complex façade systems

Ingrid Maria Paoletti, Giuseppe Conti, Giorgio Castellano, Federica Pradella

Abstract

Nel settore AEC è sempre più urgente individuare soluzioni capaci di coniugare sostenibilità ambientale, qualità progettuale e scalabilità produttiva, in un contesto segnato da trasformazioni ambientali e tecnologiche, carenza di manodopera qualificata e stagnazione della produttività. In questo scenario il trasferimento tecnologico dal settore automotive a quello delle costruzioni rappresenta una leva strategica per governare la complessità degli involucri edilizi. Il contributo propone un framework Design for Manufacturing and Assembly di derivazione automotive, applicato a un macrocomponente di facciata realizzato in Glass-fibre Reinforced Concrete e Wire Arc Additive Manufacturing. L'integrazione tra modellazione parametrica, ottimizzazione topologica e analisi di Life Cycle Assessment consente di ridurre la massa della sottostruttura, migliorandone l'efficienza materica e orientando il progetto verso soluzioni industrializzabili, scalabili e coerenti con i principi della circolarità.

In the AEC sector, there is an urgent need for solutions that integrate environmental sustainability, design quality, and production scalability. This urgency stems from a rapidly changing context marked by environmental and technological shifts, a shortage of skilled labour, and stagnant productivity. Transferring technology from the automotive to the construction sector serves as a strategic lever for managing the growing complexity of building envelopes. This paper introduces an automotive-derived Design for Manufacturing and Assembly framework. The framework is applied to a façade macro-component fabricated from Glass-fibre Reinforced Concrete and Wire Arc Additive Manufacturing. By integrating parametric modelling, topological optimisation, and Life Cycle Assessment, the approach reduces the substructure's mass. This improves material efficiency and guides the project towards industrialisable solutions that align with circularity principles.

Keywords

trasferimento tecnologico, industrializzazione della complessità, sistemi di facciata, ottimizzazione topologica, valutazione del ciclo vita

technology transfer, industrialisation of complexity, façade systems, topological optimisation, life cycle assessment

Ingrid Maria Paoletti, Full Professor of Construction Technology at the Politecnico di Milano (Italy), is the founder of the Material Balance research group, dedicated to theoretical and design experimentation, where she works on innovative technologies and materials to develop a new responsible materials culture. E-mail: ingrid.paoletti@polimi.it

Giuseppe Conti is an Architect and Executive PhD Candidate at the Politecnico di Milano (Italy), in collaboration with Pininfarina. His research focuses on integrating DfMA strategies, with a particular emphasis on transferring technology from the automotive to the architectural sector. E-mail: giuseppe1.conti@polimi.it

Giorgio Castellano is a Researcher at the Politecnico di Milano (Italy). His research focuses on innovative building systems, bio-based materials, digital fabrication and distributed production models. E-mail: giorgio.castellano@polimi.it

Federica Pradella, PhD Candidate at the Politecnico di Milano (Italy), is a member of the Material Balance research group, where she focuses on processes and technologies for innovative, distributed production and construction. E-mail: federica.pradella@polimi.it

Nel settore Architettura, Ingegneria e Costruzioni (AEC) la domanda di soluzioni capaci di bilanciare sostenibilità ambientale, qualità progettuale e scalabilità produttiva è resa urgente dalla convergenza di fattori esogeni, quali trasformazioni ambientali, tecnologiche e sociali, e di fattori endogeni, tra cui la carenza di manodopera qualificata e la persistente stagnazione della produttività (de Matos Camarinha, Goulding and Peter, 2023). In questo scenario gli obiettivi delineati dall'Agenda 2030 delle Nazioni Unite (UN, 2015), in particolare il Sustainable Development Goal (SDG) 9 su 'Industria, innovazione e infrastrutture', evidenziano la necessità di una revisione radicale dei modelli di progettazione e di produzione dell'ambiente costruito (Palumbo et alii, 2025).

Una modalità per affrontare tale transizione è riconoscere nel trasferimento tecnologico una leva per governare la complessità, già interpretata come passaggio strategico per l'innovazione in architettura (Paoletti, 2003) e oggi riletta alla luce delle dinamiche dell'Industry 4.0 (Alkhazaleh et alii, 2022): attingendo a settori che adottano un approccio sistemico questo studio introduce strumenti, criteri decisionali e logiche di processo capaci di integrare prestazioni, vincoli industriali e l'organizzazione della filiera (de Matos Camarinha, Goulding and Peter, 2023).

L'eccessiva frammentazione, dovuta anche a una progressiva specializzazione (Höweler, 2025), è tra i principali fattori che incidono sulla produttività del settore AEC; anche laddove siano disponibili strumenti digitali avanzati, questi vengono spesso adottati come supporto a compiti specialistici accentuando le discontinuità tra concept, progettazione esecutiva, produzione e cantiere (Vibæk, 2017) e indebolendo i cicli di feedback che, in un processo realmente integrato, consentirebbero di informare le scelte nelle prime fasi progettuali (Smith, Elliot and Grosskopf, 2017). A tali considerazioni si aggiunge il contributo del paradigma di Industria 5.0, che rilegge i processi produttivi in chiave integrata orientandoli verso una maggiore efficienza e flessibilità, con una più esplicita attenzione agli obiettivi di sostenibilità (Osello et alii, 2024).

Per la sua intrinseca multidisciplinarietà la progettazione degli involucri architettonici si configura come un processo complesso che coinvolge diversi stakeholder e ambiti di competenza. È in questo quadro che il contributo estende la nozione di 'componente' oltre la dimensione fisica (Richard, 2017), concependolo come un'entità producibile, assemblabile, manutenibile e disassemblabile. Accanto ai componenti materiali di una facciata possono infatti essere considerati 'componenti immateriali' i servizi di progettazione, i protocolli di verifica, i modelli computazionali, le procedure di controllo della qualità e i piani di manutenzione. In questa prospettiva il progetto diventa un'infrastruttura collaborativa, in cui la qualità dell'esito dipende dalla continuità tra le decisioni progettuali e i vincoli produttivi lungo l'intera filiera (Vibæk, 2017).

L'ambito di applicazione di questo studio riguarda la progettazione di facciate rivestite in Glass-fibre Reinforced Concrete (GRC), con particolare attenzione ai sistemi di connessione alla struttura portante principale dell'edificio. Per gestire la progettazione di tali componenti il contributo definisce un framework metodologico di derivazione automotive, basato sui principi del Design for Manufacturing and Assembly (DfMA), idoneo a quantificare la complessità tramite metriche misurabili. Lo studio è articolato in parti tra loro complementari: una prima parte inquadra il trasferimento tecnologico dal settore automotive all'AEC, considerando il ruolo delle logiche DfMA stage-gate nello sviluppo di una nozione estesa di componente e una seconda parte approfondisce i sistemi di facciata in GRC, evidenziando la gerarchia tra involucro, sottostruttura e connessioni, nonché i limiti dei telai metallici standardizzati applicati a geometrie complesse. Viene quindi introdotto il framework metodologico della ricerca, che integra GRC, modellazione parametrica, ottimizzazione topologica, Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) e Life Cycle Assessment (LCA).

Segue una parte applicativa dedicata alla definizione geometrica del modello digitale, alla simulazione strutturale preliminare e alla verifica del potenziale di riduzione della massa e dell'impatto ambientale della sottostruttura. Il contributo si conclude con una discussione critica dei risultati, dei limiti e degli sviluppi futuri, evidenziando il valore del framework come strumento per una progressiva ingegnerizzazione del componente. L'interesse scientifico della ricerca risiede nella formalizzazione di un protocollo trasferibile che integra, in un'unica struttura decisionale, il progetto, la produzione e la valutazione ambientale.

Stato dell'arte | Nel settore AEC la complessità non deriva soltanto dalla molteplicità dei componenti, ma anche dalla rete di relazioni che costituisce il sistema-progetto. In questa prospettiva le potenzialità del DfMA sono oggi ampiamente riconosciute; basti pensare al ruolo che Waqar et alii (2025) riconoscono ai Modern Methods of Construction (MMC), alla crescente attenzione del RIBA Plan of Work per l'integrazione tra fasi progettuali e costruttive (RIBA, 2020), nonché al concetto di piattaforma elaborato da Bryden Wood (2021), che propone una standardizzazione basata su interfacce, regole e processi. Ciò nonostante la diffusione più estesa di tali strategie resta limitata da alcuni ostacoli strutturali: l'isolamento dei sistemi, la frammentazione delle competenze e, soprattutto, la carenza di processi standardizzati in grado di mettere in relazione design e produzione in modo continuo e verificabile.

In questo scenario il settore automotive viene individuato come fonte di trasferimento tecnologico, in quanto industria caratterizzata da elevati livelli di complessità sistemica (Morbiducci, Polverino and Battaglia, 2023). In particolare la gestione della complessità è guidata da logiche di sviluppo del prodotto strutturate da strumenti di validazione progressiva (fasi e punti di controllo ben definiti) e da metodi orientati alla fabbricazione e all'assemblaggio, capaci di integrare requisiti prestazionali, vincoli produttivi e obiettivi ambientali. L'interesse per questo tipo di know-how non risiede nella trasposizione di tolleranze o di volumi produttivi dell'industria automobilistica, bensì nella possibilità di trasferire metodologie e strategie capaci di strutturare e gestire il passaggio alla scala industriale di componenti (Giovanardi et alii, 2024).

Se la facciata viene interpretata come un sistema integrato la sua industrializzazione deve basarsi su una standardizzazione di 'secondo livello', incentrata su logiche di processo: interfacce, sequenze di assemblaggio, criteri di verifica e scenari di fine vita. Tra i principi derivati da una gestione industriale rientrano inoltre la riduzione del numero di componenti e la configurazione in macrocomponenti più facilmente assemblabili. Come per gli edifici l'architettura di un'automobile prevede infatti componenti strutturali che costituiscono lo scheletro ed elementi non strutturali che hanno funzione estetica e di protezione dagli agenti esterni (Samad and George, 2022).

A valle di questa distinzione l'integrazione tra struttura e involucro segue la logica del Body-in-White (BIW): l'insieme della scocca portante (Fig. 1) e delle sue principali sottostrutture è concepito come riferimento geometrico e prestazionale per tutte le parti successive (Onat, 2025). Questa logica costituisce un riferimento concettuale utile per ridurre la frammentazione, facilitare l'assemblabilità e controllare la convergenza tra i requisiti prestazionali e la dimensione identitaria dell'involucro (Manni and Valzano, 2023).

Operativamente, nell'industria automotive lo sviluppo di nuovi prodotti è governato da un processo articolato in più fasi che integra progettazione e ingegnerizzazione. Il processo stage-gate è un modello ricorrente suddiviso in fasi distinte, ciascuna conclusa da un punto di controllo in cui si prendono decisioni critiche di avanzamento sulla base di criteri verificabili (Ettlie and Elsenbach, 2007). La trasposizione critica di logiche con fasi e punti di controllo ben definiti e di metodi orientati al DfMA consente di anticipare le valutazioni di fattibilità e di ridurre le variazioni. I sistemi di facciata in GRC si rivelano particolarmente adatti a questo metodo, poiché pongono la questione progettuale tra complessità geometrica, standardizzazione dei componenti e necessità di integrazione tra progetto e produzione.

Il GRC è un composito cementizio rinforzato con fibre di vetro alcali-resistenti, impiegato in architettura per realizzare elementi sottili e relativamente leggeri rispetto al calcestruzzo tradizionale, con buona qualità superficiale e ampia libertà formale (Ahmad et alii, 2022). La sua diffusione nell'involucro edilizio è legata soprattutto alla possibilità di produrre pannelli a spessore ridotto, adatti a funzioni di rivestimento e protezione, con finiture controllate e variabilità estetica (Bentur and Mindess, 2006).

Nella pratica contemporanea il GRC trova applicazione in diverse tipologie di sistema: a) pannelli di rivestimento non portanti per facciate ventilate, in cui il pannello costituisce la 'pelle' esterna e lavora in combinazione con una sottostruttura metallica e con strati funzionali retrostanti; b) pannelli isolati prefabbricati (sandwich o compositi), nei quali il GRC integra o coopera con uno strato isolante e, talvolta, con un secondo paramento o con una struttura di supporto, al fine di combinare finitura, protezione e prestazioni termo-igrometriche; c) sistemi a parete integrale o semi-integrale, in cui il GRC non è solo un rivestimento ma partecipa, con diversi gradi, alla composizione di un elemento di chiusura più complesso, includendo dispositivi di connessione, irrigidimenti, predisposizioni e dettagli per aperture, giunti e bordi.

Come riportato in Figura 2 è possibile distinguere in prima approssimazione una progressione che va da pannelli planari a pannelli a curvatura semplice, fino a pannelli a doppia curvatura e geometrie libere (Henriksen, Lo and Knaack, 2015). La complessità aumenta, tuttavia, soprattutto quando la geometria incorpora caratteristiche locali che trasformano il pannello in un dispositivo di interfac-



Fig. 1 | BIW design and monocoque structure (credit: Kutz, 2011).

cia tridimensionale (Bishop and Wilson, 2011). In tali condizioni il pannello non è più un mero elemento di rivestimento, definito soltanto dalla configurazione della superficie esterna, ma un componente che deve coordinare simultaneamente i requisiti estetici e prestazionali con i vincoli della produzione (strategie di stampo, sformatura, tolleranze), della movimentazione e del montaggio (punti di presa, posizionamento, regolazione e sequenza di assemblaggio).

La ricerca assume come riferimento un sistema di pannello GRC del tipo 'stud frame' (Fig. 3), composto da una pelle monolitica di GRC accoppiata a un telaio metallico prefabbricato, che costituisce la sottostruttura portante e rappresenta l'interfaccia tra l'involucro e la struttura principale dell'edificio (Purslow, 1990). La gerarchia dei componenti può essere descritta come: a) pelle in GRC, priva di nervature interne e irrigidita soprattutto tramite un risvolto perimetrale utile anche per la tenuta dei giunti; b) telaio metallico costituito da montanti e correnti, spesso in profili a sezione cava; c) sistema di connessione pelle-telaio basato su due famiglie di ancoraggi, flessibili a 'L' e portanti.

Nel sistema a telaio la pelle in GRC funge da rivestimento, mentre la rigidità globale e il controllo geometrico sono affidati al telaio retrostante, costituito da profili metallici standard (montanti e correnti a griglia, spesso con passo regolare). Questa configurazione risulta efficace quando l'obiettivo è produrre e installare grandi superfici piane con un'interfaccia chiara con la struttura primaria. Tuttavia, in caso di curvature, il modello a telaio retrostante presenta un limite intrinseco: per seguire una geometria non planare il telaio deve essere adattato. L'impiego di elementi standardizzati, pur offrendo vantaggi in termini di scalabilità, comporta un sovradimensionamento materico del sistema, poiché la sottostruttura richiede una quantità di materiale non pienamente ottimizzata; da qui la necessità di esplorare una metodologia in grado di ridurre la massa, mantenendo invariati i punti di interfaccia e la logica di assemblaggio.

Nel contesto delle interfacce strutturali tra i pannelli di facciata in GRC e la struttura primaria dell'edificio l'impiego di tecnologie di Directed Energy Deposition (DED), in particolare di Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM), consente di produrre componenti metallici con una libertà geometrica non vincolata dai limiti dei profili laminati. Diversi studi hanno dimostrato la fattibilità di realizzare elementi strutturali di grande scala mediante WAAM, come nel caso del ponte MX3D ad Amsterdam (Laghi et alii, 2023), nonché l'efficacia di approcci ibridi che combinano parti additivamente prodotte con elementi realizzati mediante tecnologie tradizionali (Raspall et alii, 2025). In particolare, Laghi, Savino e Gasparini (2025) propongono un approccio di 'ottimizzazione strutturale integrata' (Fig. 4) che integra l'ottimizzazione topologica, i vincoli di produzione per il WAAM e la verifica numerica.

Dal punto di vista dell'impatto ambientale il confronto tra travi in acciaio laminato a caldo e componenti WAAM ha evidenziato una riduzione delle emissioni di CO_2, a condizione che si ottenga un risparmio di massa pari almeno al 50% mediante l'impiego di tecniche di ottimizzazione topologica (Laghi, Savino and Gasparini, 2025).

Metodologia della ricerca e definizione del framework | Nello sviluppo del framework la ricerca individua quattro piani di approfondimento, selezionati per la loro pertinenza rispetto ad altrettanti temi: gestione della complessità geometrica, definizione dell'interfaccia tra pelle e struttura, applicazione di logiche DfMA, integrazione tra ottimizzazione, fabbricazione e valutazione ambientale. Il settore automotive, e in particolare la logica BIW, rappresenta la prima area semantica da cui trasferire strategie di interfaccia, pur in presenza di materiali, tempi e livelli di unicità profondamente differenti rispetto a quelli del settore AEC.

Il campo dei sistemi di facciata in GRC mostra invece come il materiale sia in grado di supportare elevate complessità geometriche, ma evidenzia anche che il principale nodo critico non riguarda la pelle in sé, bensì la sottostruttura e la risoluzione dell'interfaccia con la struttura portante. Ed è nell'interfaccia che si colloca la tecnologia WAAM, dove la complessità si concentra maggiormente e dove una fabbricazione additiva mirata può risultare metodologicamente ed economicamente più efficiente rispetto a un'applicazione estensiva. Infine gli studi che integrano l'ottimizzazione topologica, la simulazione strutturale e l'efficienza materica, come l'approccio ibrido (Laghi et alii, 2023), forniscono un riferimento metodologico importante per collegare riduzione di massa, producibilità e impatto ambientale.

Il framework proposto in Tabella 1 è concepito come strumento trasferibile oltre gli obiettivi del presente studio: pur facendo riferimento a soluzioni tecniche specifiche, si fonda su una struttura di lavoro adattabile a diversi sistemi costruttivi, con le opportune modifiche. È possibile modulare i contenuti e gli strumenti di ciascuna fase in funzione del contesto, mantenendo invariata l'architettura decisionale e garantendo una progressiva integrazione della componente ingegneristica, supportata da punti di controllo che regolano il passaggio tra le fasi. Il framework viene utilizzato per gestire le diverse componenti del macrocomponente di facciata: pelle esterna, sottostruttura, sistema di connessioni, giunti e stratigrafie funzionali, nonché la logistica, la posa e gli scenari di manutenzione e di fine vita; all'interno di questa cornice metodologica il contributo specifico del presente studio si concentra sulla riduzione della massa e sulla valutazione LCA.

Nella fase iniziale di 'Concept Evaluation' il framework prevede la definizione degli obiettivi progettuali e la formalizzazione della complessità geometrica del pannello e delle interfacce strutturali. Vengono definiti il dominio di progetto, i requisiti architettonici e funzionali e i primi Indicatori Chiave di Prestazione (KPI) di producibilità e di assemblaggio. La fase di 'Concept Definition and Feasibility' introduce un modello di riferimento parametrico costituito da un pannello GRC e da un telaio, entrambi caratterizzati da un elevato grado di complessità geometrica, rispetto al quale si prevede l'integrazione selettiva della tecnologia WAAM. In questa fase sono previste analisi preliminari degli elementi finiti, si definiscono i vincoli per l'ottimizzazione topologica e si imposta il sistema di valutazione ambientale (LCA), includendo unità funzionali, confini del sistema e indicatori.

La validazione della fattibilità tecnica, produttiva e ambientale costituisce il criterio di accesso alle fasi successive. La fase di 'Development' comprende il nucleo ingegneristico del framework. Qui

si consolida il modello digitale, si applicano strategie di ottimizzazione topologica alla sottostruttura e si definisce l'architettura ibrida che integra WAAM ed elementi standardizzati. Le prestazioni della soluzione ottimizzata vengono confrontate con quelle della configurazione di riferimento in termini strutturali, materiali e ambientali, integrando strategie di Design for Disassembly (DfD). La validazione avviene tramite prototipazione, verificando la riduzione di massa, il comportamento strutturale e il miglioramento degli indicatori LCA. Superata la fase di sviluppo il processo entra nella fase di industrializzazione.

La fase di 'Tooling and Process Validation' verifica la ripetibilità del workflow produttivo attraverso il controllo dei tempi di ciclo, delle tolleranze dimensionali e dei consumi energetici. Contestualmente l'analisi LCA viene aggiornata sulla base di dati reali di processo per validare le ipotesi ambientali formulate nelle fasi precedenti. Segue la fase di 'Pre-Series' in cui si produce e si testa una piccola serie di pannelli in condizioni operative, valutando l'installazione, il disassemblaggio, i danneggiamenti e la separabilità dei materiali. Questa fase consente di validare la robustezza del sistema e di consolidare le strategie DfD. Infine la fase di 'Ramp-Up' è orientata alla stabilizzazione dei KPI produttivi e ambientali, alla definizione degli standard finali delle interfacce e alla verifica della scalabilità del sistema. L'attenzione si sposta dalla singola configurazione ottimizzata alla capacità del processo di replicarsi su geometrie diverse, mantenendo costanti la qualità e le prestazioni, nonché il controllo del processo.

Un elemento caratterizzante del framework risiede nell'assumere lo sviluppo del componente come parte di una linea produttiva controllata, e non come esito isolato di una sequenza discontinua di operazioni. Ciò consente di considerare fin dalle fasi iniziali non solo la configurazione geometrica e strutturale del componente, ma anche l'ottimizzazione degli spostamenti, la prefabbricazione, il trasporto e la posa in opera, riducendo così la frammentazione tipica della filiera AEC.

Applicazione del framework al caso studio | Negli ultimi due decenni l'ottimizzazione topologica si è affermata come uno degli strumenti computazionali più potenti per la progettazione strutturale avanzata, consentendo la distribuzione ottimale del materiale all'interno di un dominio progettuale in funzione di specifici vincoli prestazionali, quali la minimizzazione della cedevolezza strutturale o la limitazione della frazione volumetrica (Takezawa, Nishiwaki and Kitamura, 2010).

L'interesse per la progettazione 'leggera' si colloca oggi in un più ampio quadro di sostenibilità ambientale: la riduzione della massa strutturale comporta infatti una diminuzione del consumo di materiali primari e un abbattimento dei carichi energetici durante le fasi di produzione e d'uso. La maggior parte degli studi si è focalizzata sull'ottimizzazione monomateriale relativa a travi strutturali

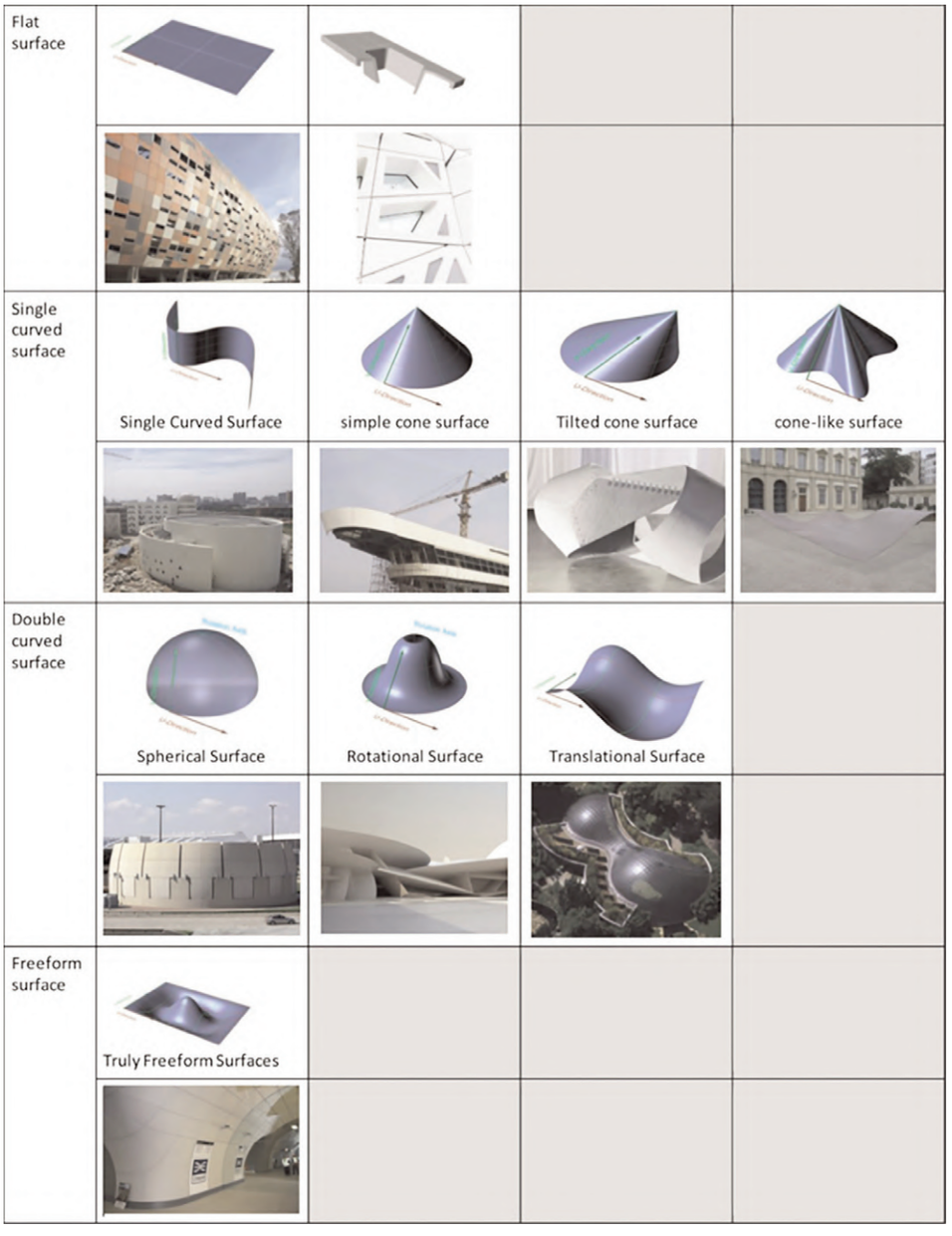


Fig. 2 | GRC panel complexity (source: Henriksen, Lo and Knaack, 2015).

(Damtsas et alii, 2025). Nel contesto della manifattura additiva metallica e, in particolare, del WAAM, questa relazione tra ottimizzazione topologica e sostenibilità ha assunto una rilevanza crescente.

Lo studio propone l'integrazione di tecniche di ottimizzazione topologica e di processi WAAM all'interno del framework descritto, con l'obiettivo di sviluppare componenti strutturali ibridi GRC-WAAM in grado di ridurre in modo significativo la massa rispetto ai telai metallici standardizzati, migliorando l'efficienza materica dell'interfaccia e ottimizzando la distribuzione delle sollecitazioni lungo le traiettorie di carico. Tale riduzione di massa si inserisce in un approccio il cui beneficio ambientale è misurabile in termini di riduzione delle emissioni lungo l'intero ciclo di vita del componente.

L'applicazione del framework prende avvio da un modello base, inteso come configurazione strutturale tecnicamente realizzabile secondo le tecniche costruttive correnti e coerente con la logica costruttiva del sistema. La sezione mostrata in Figura 5 illustra una configurazione tipica in cui la facciata si innesta su una soletta in calcestruzzo e su un cordolo perimetrale. In questo tipo di sistemi la geometria della sezione può variare in funzione delle scelte architettoniche e delle condizioni di progetto: per gestire tale variabilità geometrica è stato sviluppato, tramite Grasshopper, un modello parametrico (Figg. 6, 7) per controllare i parametri morfologici dell'interfaccia di facciata, quali curvatura, inclinazione e continuità superficiale, mantenendo invariata la gerarchia dei componenti del sistema.

L'involucro in GRC riferito al macrocomponente studiato presenta una superficie complessiva di circa 6 m^2 e uno spessore nominale di 24 mm, per un volume di circa 0,14 m^3. Assumendo una densità media di 2.400 kg/m^3, la massa del pannello è compresa tra 336 e 346 kg, corrispondente a un peso proprio di circa 3,3-3,4 kN; tale valore rappresenta il carico principale trasferito dalla pelle esterna alla sottostruttura metallica. A partire dal modello parametrico è stata quindi condotta un'analisi di simulazione strutturale utilizzando l'ambiente di calcolo Intact Simulation, integrato nello stesso workflow parametrico.

Il dominio strutturale è stato discretizzato mediante una rappresentazione voxel, adeguata a una fase preliminare di concept e finalizzata all'identificazione dei principali percorsi di trasferimento delle azioni all'interno del sistema. Nel modello sono stati applicati due carichi equivalenti: un carico gravitazionale verticale pari a 3,3 kN, rappresentativo del peso proprio del pannello in GRC, e un carico orizzontale pari a 4,7 kN, derivato da una pressione del vento semplificata applicata alla superficie del macrocomponente. L'analisi ha consentito di calcolare diversi campi tensionali e deformativi; tra questi, la densità di energia di deformazione (Fig. 8) è stata utilizzata come parametro principale per l'interpretazione del comportamento strutturale del sistema. La sensibilità topologica (Fig. 9) mostra invece le regioni di maggiore rilevanza strutturale, informazione che costituisce la base per la fase di ottimizzazione topologica.

Risultati e confronto tra modello base e configurazione ottimizzata | Dal punto di vista quantitativo il volume strutturale iniziale pari a 0,1716 m^3 è stato ridotto a 0,137 m^3, corrispondente a una riduzione complessiva di materiale pari a circa il 20% (Figg. 10, 11).

La Tabella 2 sintetizza i principali parametri fisici del confronto tra il modello di riferimento e la configurazione ottimizzata, evidenziando gli effetti della riduzione di massa sulla sottostruttura metallica. Studi precedenti indicano che valori compresi tra il 30% e il 50% consentono generalmente di ottenere configurazioni strutturali realistiche mantenendo la continuità dei percorsi di carico (Bendsøe and Sigmund, 2004). Nel presente studio è stata adottata una riduzione del volume inferiore rispetto a quella generalmente riportata in letteratura. Questa scelta conservativa non deriva da una calibrazione strutturale definitiva e, per questo motivo, è stata introdotta a titolo esplorativo nella fase preliminare del framework metodologico proposto, con l'obiettivo di indagare il potenziale di riduzione di massa del sistema e di individuare i principali percorsi di trasferimento delle azioni.

È stata condotta una valutazione ambientale preliminare mediante analisi LCA per confrontare l'impatto climatico incorporato nella sottostruttura metallica di interfaccia in due configurazioni del medesimo macrocomponente: 1) una configurazione di riferimento, corrispondente al componente non ottimizzato; 2) una configurazione derivata da un'ottimizzazione topologica, ritenuta producibile tramite WAAM. Il rivestimento in GRC è considerato invariato tra le alternative (336 kg in entrambi i casi) e pertanto escluso dal confronto principale sulla sottostruttura, poiché non discriminante rispetto all'obiettivo nella fase iniziale dello studio. L'analisi è impostata secondo i principi e i requisiti delle norme ISO 14040 e ISO 14044 (ISO 2006a; 2006b) ed è riportata come studio cradle-to-gate, coerente con l'impostazione modulare A1–A3 di EN 15804 (CEN, 2019) e con il quadro metodologico di EN 15978 (CEN, 2011).

Il modello è implementato in SimaPro Faculty 10 utilizzando il database ecoinvent 3, con il cut-off system e il metodo LCIA ReCiPe 2016 Midpoint (H). L'indicatore considerato è esclusivamente il Global Warming Potential (GWP, in kgCO_2eq). L'Unità Funzionale (FU) è definita come un macrocomponente di interfaccia per pannello, con dimensioni di 2,4 m × 1 m. Il confronto assume l'equivalenza funzionale tra le due alternative sebbene la configurazione ottimizzata non sia stata sottoposta a una validazione strutturale completa. In questa fase l'LCA è utilizzata come strumento di analisi per verificare la plausibilità del compromesso tra la riduzione della massa e l'incremento dell'energia di processo.

L'inventario utilizzato si limita ai contributori dominanti del GWP: per la configurazione di riferimento il processo è modellato come input di 1.347 kg di acciaio a bassa lega; la configurazione ottimizzata è invece modellata con un input di 1.076 kg di acciaio a bassa lega e di 150 kWh di elettricità di processo, assunti come valori dell'energia necessaria per la deposizione WAAM. In entrambi i casi il risultato è definito come un'unità del macrocomponente. I dataset utilizzati sono: Steel, low-alloyed 'GLO | market for steel, low-alloyed | Cut-off', S per l'acciaio ed 'Electricity', medium voltage {RER}' per l'elettricità di processo. Il perimetro include quindi: a) la produzione del materiale metallico (A1–A3 per l'acciaio); b) il consumo di elettricità di processo per la deposizione WAAM. Sono invece esclusi: trasporto in cantiere e installazione (A4–A5); uso, manutenzione e sostituzione (B); fine vita (C); crediti oltre i confini del sistema (D); consumabili ausiliari non ancora quantificati in modo robusto, quali gas di protezione, utensili o post-elaborazione.

I risultati riportati in Tabella 3 mostrano che il GWP della configurazione baseline è pari a 2.783,45 kg CO_2eq/FU, mentre quello della configurazione ottimizzata, realizzabile tramite WAAM, è pari a 2.273,60 kgCO_2eq/FU, con una riduzione assoluta

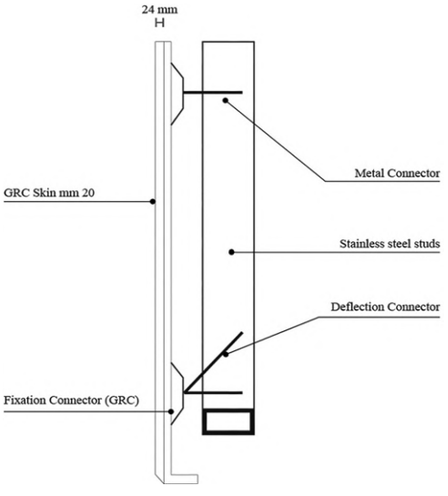


Fig. 3 | GRC: stud frame technological solution (credit: the Authors, 2024).

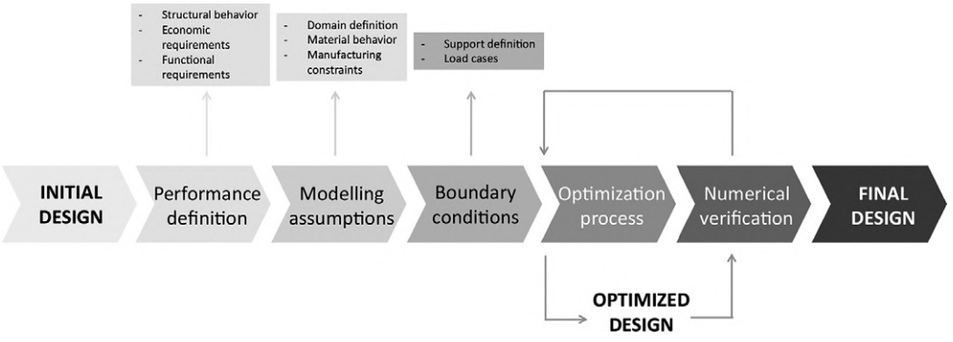


Fig. 4 | Conceptual flowchart of the mixed approach to structural optimisation (source: Laghi et alii, 2023).

di circa 509,85 kgCO_2eq e una riduzione relativa di circa 18,3%. In termini di massa la riduzione del frame metallico è pari a 271 kg, ossia circa il 20%.

In seconda analisi, al fine di contestualizzare l'effetto della riduzione della sottostruttura metallica rispetto all'intero macrocomponente, è stata sviluppata una stima addizionale includendo anche il rivestimento, il cui contributo è stato assunto pari a 336 kg/FU in entrambe le alternative, garantendo la neutralità del confronto rispetto a tale componente. In assenza di un dataset specifico per pannelli in GRC nel database selezionato, il rivestimento è stato modellato mediante il dataset 'fibre cement facing tile', large format {RoW} | fibre cement tile production, large format | Cut-off, S, adottato come proxy tecnologicamente coerente per gli elementi di rivestimento cementizio fibrorinforzato.

Sono stati quindi definiti due processi aggregati: 1) configurazione baseline completa, costituita da 1.347 kg di acciaio a bassa lega e 336 kg di rivestimento; 2) configurazione ottimizzata completa, costituita da 1.076 kg di acciaio a bassa lega, 336 kg di rivestimento e 150 kWh di elettricità di processo per la deposizione WAAM. I risultati mostrano che il GWP del macrocomponente completo passa da 3.259,55 kgCO_2eq/FU per la configurazione baseline a 2.749,69 kgCO_2eq/FU per la configurazione ottimizzata, corrispondendo a una riduzione assoluta di circa 509,85 kgCO_2eq e a una riduzione relativa di circa il 15,6%.

Rispetto ai risultati della sola sottostruttura l'inclusione del rivestimento determina dunque una riduzione percentuale attenuata, pur mantenendo invariato il beneficio assoluto. Rispetto al contributo della sottostruttura metallica il rivestimento contribuisce per circa 476 kgCO_2eq/FU, configurandosi come secondo fattore determinante dell'impatto complessivo. L'analisi dei contributi conferma che la produzione dell'acciaio rimane la principale fonte di GWP complessivo, con un'incidenza compresa tra l'81% e l'85%, mentre il rivestimento contribuisce per circa il 15-17%; il contributo dell'elettricità di processo associata alla WAAM risulta invece marginale su scala di macrocomponente. Trattandosi di una stima preliminare basata su un dataset rappresentativo del rivestimento in GRC, i risultati devono essere interpretati come indicativi e finalizzati soprattutto a esplicitare il peso relativo della sottostruttura rispetto al componente completo.

Studi LCA su tecnologie WAAM adottano frequentemente confini di sistema ristretti, spesso di tipo gate-to-gate, per isolare il contributo dei fattori di processo più rilevanti (Shah et alii, 2023). L'obiettivo non è la quantificazione completa del ciclo di vita del prodotto, bensì la comprensione dei compromessi tra l'uso efficiente del materiale e il fabbisogno energetico del processo. Rispetto a tale impostazione il presente studio adotta un perimetro leggermente più ampio, includendo non soltanto l'elettricità di processo, ma anche la produzione di acciaio. Tale scelta è coerente con il fatto che il confronto non riguarda due sole varianti di deposizione, bensì due configurazioni dello stesso componente con masse metalliche diverse; in questo caso, infatti, la variabile più importante non è il processo additivo in sé, ma la relazione tra la riduzione di massa e il carico energetico di deposizione.

La letteratura su WAAM evidenzia inoltre che la modellazione dei beni strumentali e delle infrastrutture di processo è spesso esclusa o trattata in modo semplificato, poiché l'allocazione degli impatti sulla vita utile, sulla produttività e sui tassi di utilizzo delle attrezzature introduce un elevato grado d'incertezza (Spreafico, Kokare and Godina, 2026). Analogamente, per componenti ancora in fase di sviluppo, alcune fasi quali trasporto, installazione, uso e fine vita vengono demandate a sviluppi futuri, quando le geometrie, le prestazioni e gli scenari di implementazione risultano più stabilizzati. In questo senso la scelta di presentare l'analisi LCA limitata ad A1–A3 è metodologicamente coerente con la maturità attuale del caso di studio e con il posizionamento del contributo nella fase di 'Concept Definition and Feasibility'.

Per verificare la sensibilità del risultato rispetto a possibili incrementi del fabbisogno energetico della deposizione additiva sono stati definiti due scenari aggiuntivi mantenendo costante la massa di acciaio della configurazione ottimizzata (1.076 kg/FU) e variando unicamente il consumo di elettricità di processo a 225 kWh/FU e 300 kWh/FU (Tab. 4). I risultati mostrano che il GWP della sola sottostruttura ottimizzata passa da 2.273,60 kgCO_2eq/ FU nello scenario nominale (150 kWh/FU) a 2.298,67 kgCO_2eq/FU nello scenario +50% energia e a 2.323,74 kgCO_2eq/FU nello scenario +100% energia.

Se il confronto viene esteso al macrocomponente completo, il GWP passa da 2.749,69 kgCO_2eq/FU nello scenario nominale a 2.774,76 kg CO_2eq/FU nello scenario +50% energia e a 2.799,83 kgCO_2eq/FU nello scenario +100% energia. Sebbene il GWP aumenti in modo coerente con l'aumentare dell'energia di processo, la configurazione ottimizzata resta ambientalmente preferibile rispetto alla baseline in tutti gli scenari analizzati: ciò conferma che il fattore principale dell'impatto climatico è la produzione di acciaio, mentre l'energia di deposizione additiva incide come parametro secondario. Il beneficio ambientale osservato risulta pertanto principalmente legato alla riduzione della massa metallica del componente. Per individuare le condizioni in cui la soluzione ottimizzata risulta ambientalmente preferibile, viene definita una semplice condizione di soglia basata sul bilancio tra massa risparmiata ed energia aggiuntiva:

$$(m_{baseline} - m_{optimized}) \times EF_{steel} > E_{WAAM} \times EF_{el}$$

dove: $m_{baseline} - m_{optimized}$ = 271 kg; EF_{steel} è il fattore emissivo associato al dataset dell'acciaio; E_{WAAM} è il consumo elettrico del processo; EF_{el} è il fattore emissivo associato al dataset elettrico adottato.

Nel caso di studio analizzato i risultati mostrano che la riduzione di 271 kg di acciaio è sufficiente a mantenere la configurazione ottimizzata, preferibile dal punto di vista del GWP, anche in presenza di un raddoppio dell'elettricità di processo, passando da 150 a 300 kWh. Il risultato indica quindi che, entro i confini di sistema adottati, il vantaggio climatico della soluzione ottimizzata è robusto rispetto a variazioni plausibili del carico energetico della deposizione. La soglia non deve essere interpretata come una proprietà intrinseca della WAAM, bensì come una condizione metodologica: il processo additivo risulta ambientalmente vantaggioso solo quando consente una riduzione di massa tale da compensare l'energia aggiuntiva richiesta.

Conclusioni, limiti della ricerca e sviluppi futuri | La ricerca ha esplorato il potenziale di trasferimento tecnologico tra i settori automotive e AEC, proponendo un framework metodologico basato sui principi DfMA. In questa prospettiva la fase applicativa del contributo ha come obiettivo principale la definizione di una struttura di processo capace di integrare, in modo progressivo e verificabile, esigenze architettoniche, vincoli produttivi, criteri di assemblaggio, valutazioni ambientali e ipotesi di industrializzazione, anziché la validazione completa del componente ottimizzato.

Dal punto di vista dei limiti l'equivalenza funzionale tra la configurazione di riferimento e quella ottimizzata è assunta a livello concettuale, necessitando di verifica mediante analisi strutturali complete o prototipi fisici. La producibilità mediante WAAM è ancora legata alla letteratura e non è stata verificata rispetto a vincoli di deposizione, tolleranze, finitura, tempi di processo e requisiti di certificazione.

L'analisi LCA preliminare mostra che la configurazione ottenuta mediante ottimizzazione topologica presenta un GWP inferiore rispetto a quello della configurazione di riferimento. Tale risultato, principalmente associato alla riduzione della massa metallica del frame, deve tuttavia essere letto alla luce di alcune limitazioni: l'equivalenza funzionale tra configurazione di riferimento e ottimizzata è assunta a livello di concept e non ancora validata mediante verifiche strutturali complete; il perimetro limitato ad A1–A3 esclude contributi potenzialmente rilevanti quali trasporto, installazione, uso, manutenzione, disassemblaggio e fine vita; infine il modello non include ancora consumabili di processo, gas di protezione o eventuali post-lavorazioni.

Sul piano dell'adozione la diffusione di questo approccio orientato alla fabbricazione incontra inoltre alcune barriere strutturali del settore AEC, tra cui i costi ancora elevati delle tecnologie additive metalliche che ne ostacolano l'integrazione, la limitata standardizzazione, la necessità di procedure di controllo e certificazione ancora in evoluzione, nonché la frammentazione della catena di approvvigionamento. A tali criticità si aggiungono ostacoli di natura culturale e organizzativa, legati alla difficoltà di superare la separazione tra progettazione, simulazione e produzione, nonché ostacoli informativi dovuti alla limitata disponibilità di dati affidabili sui consumi reali di processo, sugli scenari di fine vita e sui benefici ambientali misurabili nelle prime fasi decisionali.

In termini di trasferibilità la combinazione tra modellazione parametrica, simulazione strutturale, ottimizzazione topologica e analisi LCA ha mostrato come sia possibile orientare, già nella fase di 'Concept Definition and Feasibility', le decisioni progettuali verso una maggiore efficienza materica, collocando lo studio in coerenza con gli obiettivi dell'SDG 9. In modo complementare la ricerca intercetta l'SDG 12 attraverso la riduzione della massa del componente, l'attenzione all'efficienza materica, l'impiego dell'analisi LCA come supporto alle decisioni e l'integrazione di logiche orientate al Design for Disassembly e alla prefabbricazione controllata. Più indirettamente lo studio dialoga con l'SDG 13, in quanto la riduzione del GWP costituisce un indicatore preliminare di beneficio climatico, e con l'SDG 11, poiché l'innovazione dei sistemi di involucro può contribuire, in modo mediato, a una maggiore qualità, manutenibilità e sostenibilità dell'ambiente costruito.

I futuri sviluppi dovranno quindi concentrarsi sulla validazione strutturale del componente otti-

Phase	Content	Deliverable	Monitored KPIs	Gate criteria (go/no-go)
1. Concept Evaluation	WP1 | Definition of objectives and definition of complexity (panel curvature + interface geometry)	D1.1 | Architectural / functional requirements (insulated or non-insulated cladding panel, integrated systems) D1.2 | Geometric "design space" (geometry, system typology, connections, and interfaces) D1.3 | Initial exploratory prototypes (ABS/PLA) D1.4 | Definition of complexity criteria	KPI panel (Manufacturing feasibility) Mold complexity (0–10) Demouldability (number of undercuts) Minimum radius and risk of critical edges (mm) KPI interface (Manufacturing feasibility) Feasibility with standardized elements (go/no-go) Complexity of the load path: weight → gravity, wind → flexure (go/no-go) Variety of typological connections with the panel and primary structure (no. of typologies) KPI component (Assembly / Disassembly strategies): Parts per component (no.) Fasteners (no.) Transport compatibility (go/no-go) Share of on-site vs. off-site work (low / medium / high)	Complexity formalized into measurable constraints Geometry compatible with production / assembly principles Defined and traceable KPIs
2. Concept Definition & Feasibility	WP2 | Baseline model GRC panel + stud frame + interfaces	D2.1 | Geometric baseline of the component (v0): Reference dimensions Parameterization of complexity features Panel stratigraphy and thicknesses Interface and connection layout D2.2 | WAAM Integration List of functions suitable for WAAM Definition of standard elements (plates, bolting) D2.3 | Preliminary engineering feasibility package: Preliminary FEA (v1) D2.4 | Process hypothesis related to integration with WAAM technology General WAAM sequence (material / thickness; range / tolerances) D2.5 | Preliminary samples/tests to confirm the geometric feasibility of the interfaces in WAAM D2.6 | LCA setup Functional unit (e.g. 1 m² of façade / 1 typical panel / service life) System boundaries (cradle-to-gate / cradle-to-site / cradle-to-grave) Selected indicators (e.g. GWP + primary energy + 1–2 additional indicators) Data collection plan for WAAM (energy, waste, material) and for standard GRC / steel D2.7 | Definition of geometric and load constraints for topology optimisation D2.8 | Risk analysis	KPI panel Mold definition (go/no-go) Maximum panel deformation (δ_{max}, mm) Estimated panel mass (kg/m²) KPI interface Layout fixed (go/no-go) Level of standardization (number of connection typologies) Topology optimization problem defined: objective + constraints + non-design regions + load conditions (go/no-go) KPI component LCA setup completed (go/no-go) Estimated on-site work (low / medium / high) Transportability verified (go/no-go + limits) DfD feasibility (low / medium / difficult)	Panel geometry and manufacturability (Panel readiness) Interfaces and constraint scheme Process, scalability, and sustainability

Tab. 1a | Conceptual framework (credit: the Authors, 2026).

Phase	Content	Deliverable	Monitored KPIs	Gate criteria (go/no-go)
3. Development	WP3.1	Consolidation of the digital model WP3.2 | Topology optimization of the substructure (core engineering) WP3.3 | Definition of the hybrid WAAM + standard elements architecture WP3.4 | Comparative structural assessments (baseline vs optimised) WP3.5 | Development of the DfMA strategy (assembly) and process update WP3.6 | DfD (Design for Disassembly) strategy integrated with geometry and interfaces WP3.7 | Comparative LCA (baseline vs. optimized) and improvement loop WP3.8 | Prototyping / mock-up and 'fit-for-assembly' validation WP3.9 | Risk register update and decision on the variant	D3.1 | Optimized model (baseline vs top-opt.) D3.2 | Final engineering assessments (FEA v2) with baseline vs. optimized comparison D3.3 | DfMA strategy + assembly workflow D3.4 | DfD (Design for Disassembly) strategy D3.5 | Preliminary comparative LCA (baseline vs optimised) D3.6 | Mock-up / functional prototype (defined level) D3.7 | Updated risk register (v1)	Technical KPIs (performance) Δmass (kg/m² and %) — frame and total component δ_max (mm) — baseline vs. optimized (and Δ%) DfMA KPIs (assembly/scalability) Δpart count (no.) and Δfastener count (no.) Estimated assembly time (min/panel) — factory vs. site Standardization ratio (% mass or % standard parts vs. WAAM/custom) DfD KPIs (end of life) DfD rating (low / medium / high feasibility) with explicit criteria: access, reversibility, material separation Potential separability (% recoverable metal/scenario) LCA KPIs (comparative) ΔGWP ($kgCO_2e/m^2$ and %) — baseline vs. optimized Δprimary energy (MJ or kWh eq/m² and %) WAAM manufacturability KPIs (capability) Validated WAAM interfaces (yes/no) — fit-up and tolerances (mock-up)	Top-opt + hybrid architecture produce a measurable improvement: Δmass < 0 (reduction), or a trade-off justified by LCA / performance Engineering performance validated Comparative LCA v1 completed DfD strategy defined
4. Tooling & Process Validation	WP4 | Production validation: WAAM workflow + GRC casting + assembly (jig, QC, repeatability)	D4.1 | Process sheet D4.2 | Tooling D4.3 | QC control plan D4.4 | Rigging/installation plan D4.5 | LCA updated with real process data	KPI Process Cycle time (min/panel) for WAAM, casting, and assembly Waste (%); repeatability (dimensional tolerances, mm) Pull-out / connection strength (kN, if tested) Process energy (kWh/panel) Updated LCA (indicators per functional unit, e.g. 1 m² / panel)	Repeatable and transferable process Quality under control Documentation ready Updated LCA consistent with real process data Readiness for pre-series
5. Pre-Series	WP5.1 | Small series WP5.2 | Field tests (installation, maintenance, disassembly)	D5.1 | Production of n panels D5.2 | Final mock-up D5.3 | Field tests D5.4 | DfD validation on sample D5.5 | Installation / maintenance manuals	KPI Pre-series Yield (compliant parts / produced parts) Installation time (min/panel) and number of operators Disassembly time (min) + % metal / matrix separability Handling damage (%) Near-final LCA with real logistics	Repeatability demonstrated Robust installation Verifiable disassembly Remaining critical issues mapped Readiness for scaling
6. Ramp-Up	WP6 | Scalability and stabilization (KPIs, stakeholder feedback, lessons learned)	D6.1 | Testing under real conditions D6.2 | Production KPIs; client / manufacturer Feedback D6.3 | Final interface standards D6.4 | Final LCA + recommendations	KPI Production Stabilized KPIs: quality (defects/100), time, waste estimated cost (€/m² or €/panel, if available) in-service performance (inspections) final LCA EoL scenarios; stakeholder feedback score	Smooth transition to full-scale; stable KPIs Documented and implementable system Framework transferable to other cases with standard interfaces

Tab. 1b | Conceptual framework (credit: the Authors, 2026).

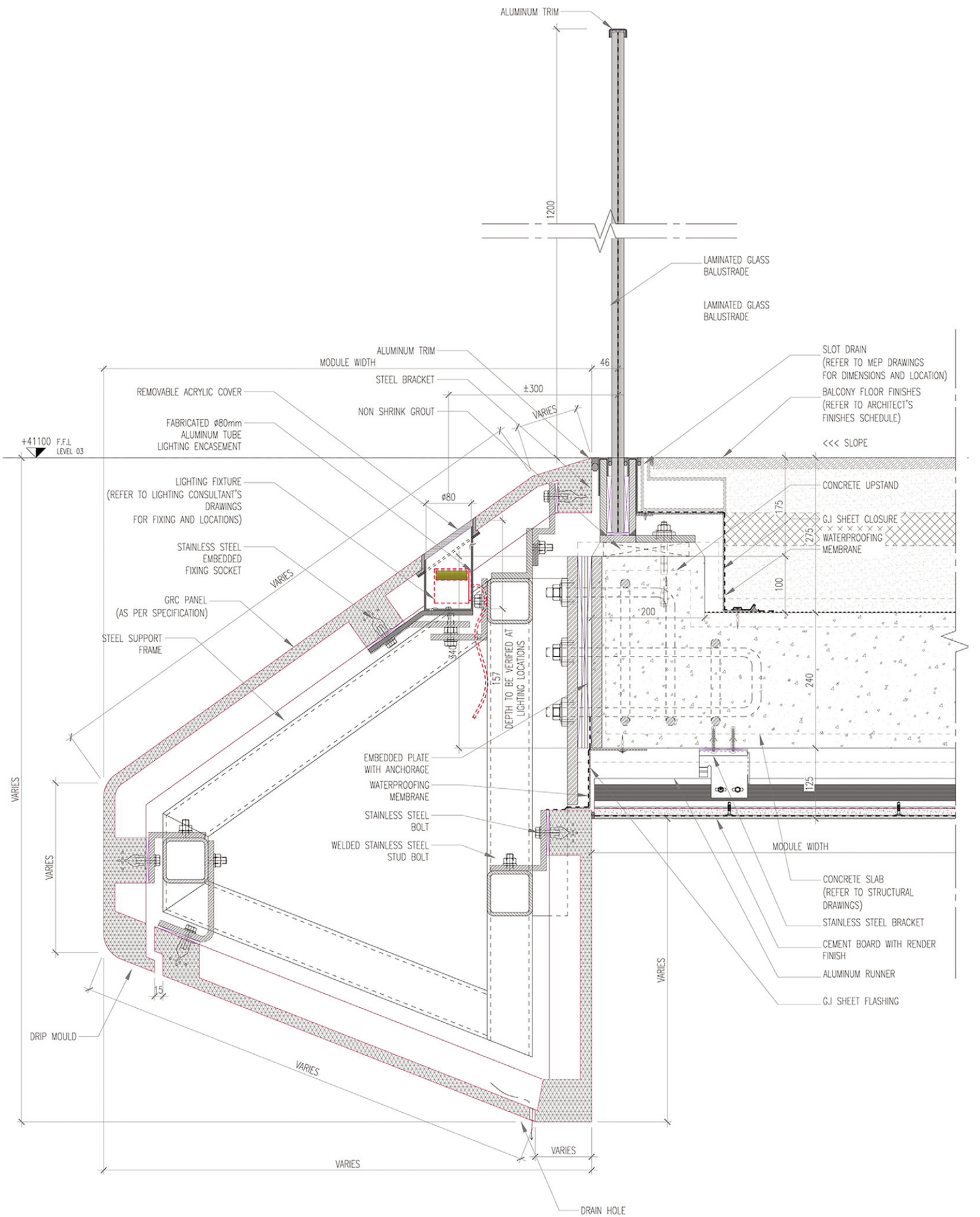


Fig. 5 | Detail section: system architecture and component families (credit: the Authors, 2026).



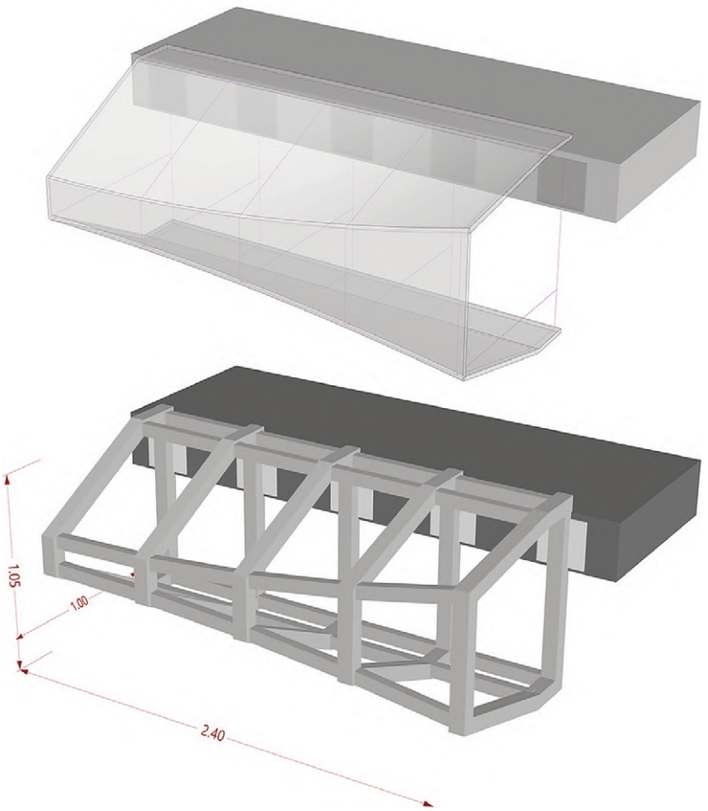


Fig. 6 | Macrocomponent (credit: the Authors, 2026).

Fig. 7 | Macrocomponent: type module with a length of 2,40 m and a maximum depth of 1,00 m (credit: the Authors, 2026).

mizzato, sulla verifica della sua producibilità reale mediante WAAM e sull'estensione dell'analisi ambientale a ulteriori contributi di inventario e alle fasi A4–A5, B e C. Nel complesso, la ricerca evidenzia che il potenziale ambientale della soluzione ottimizzata non dipende dalla sola adozione della tecnologia additiva, bensì dalla sua capacità di rendere producibili configurazioni a maggiore efficienza materica. Più che affermare la superiorità di una tecnologia, lo studio propone una linea metodologica basata su un approccio sistemico, in cui il DfMA consente di mantenere centrale il ruolo del progetto e di affrontare la complessità del componente su più livelli: geometrico, tecnologico, produttivo e ambientale.

In the Architecture, Engineering and Construction (AEC) sector, the demand for solutions capable of balancing environmental sustainability, design quality and production scalability is made urgent by the convergence of exogenous factors, such as environmental, technological and social transformations, and endogenous factors, including the shortage of skilled labour and persistent productivity stagnation (de Matos Camarinha, Goulding and Peter, 2023). Against this backdrop, the goals outlined in the United Nations' 2030 Agenda (UN, 2015), in particular Sustainable Development Goal (SDG) 9 on 'Industry, Innovation and Infrastructure', highlight the need for a radical overhaul of the design and production models of the built environment (Palumbo et alii, 2025). One way to deal with this transition is to recognise technology transfer as a lever to govern complexity, already interpreted as a strategic step for innovation in architecture (Paoletti, 2003) and today reinterpreted in the light of Industry 4.0 dynamics (Alkhazaleh et alii, 2022): by drawing on sectors that adopt a systemic approach, this study introduces tools, decision-making criteria and process logics capable of integrating performance, industrial constraints and the organisation of the supply chain (de Matos Camarinha, Goulding and Peter, 2023).

Excessive fragmentation, also due to progressive specialisation (Höweler, 2025), is among the main factors affecting productivity in the AEC sector. Even where advanced digital tools are available, these are often adopted as support for specialised tasks, accentuating discontinuities between concept, executive design, production and construction site (Vibæk, 2017) and weakening the feedback loops that, in a truly integrated process, would enable choices to be informed in the early stages of design (Smith, Elliot and Grosskopf, 2017). Added to these considerations is the contribution of the Industry 5.0 paradigm, which reinterprets production processes from an integrated perspective, orienting them towards greater efficiency and flexibility, with a more explicit focus on sustainability objectives (Osello et alii, 2024).

Due to its inherently multidisciplinary nature, the design of architectural envelopes is a complex process that involves multiple stakeholders and areas of expertise. It is within this framework that the contribution extends the notion of 'component' beyond the physical dimension (Richard, 2017), conceiving it as an entity that can be produced, assembled, maintained and disassembled. Alongside the material components of a façade, design services, verification protocols, computational models, quality control procedures, and maintenance plans can, in fact, be considered 'immaterial components'. In this perspective, the project becomes a collaborative infrastructure, in which the quality of the outcome depends on the continuity between design decisions and production constraints throughout the entire supply chain (Vibæk, 2017).

The scope of this study concerns the design of façades clad in Glass-fibre Reinforced Concrete (GRC), with a focus on the connection systems to the building's main load-bearing structure. To manage the design of such components, the contribution defines an automotive-derived methodological framework based on the principles of Design for Manufacturing and Assembly (DfMA), to quantify complexity through measurable metrics.

The study is divided into complementary parts. A first part frames the technology transfer from automotive to AEC, considering the role of DfMA stage-gate logics in the development of an extended notion of component. A second part explores façade systems in GRC, highlighting the hierarchy between envelope, substructure and connections, as well as the limitations of standardised metal frames applied to complex geometries. The research's methodological framework is then introduced, integrating GRC, parametric modelling, topological optimisation, Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM), and Life Cycle Assessment (LCA).

This is followed by an application section dedicated to the geometric definition of the digital model, preliminary structural simulation, and verification of the substructure's mass-reduction potential and environmental impact. The contribution concludes with a critical discussion of the results, limitations and future developments, highlighting the value of the framework as a tool for progressive component engineering. The scientific interest of the research lies in formalising a transferable protocol that integrates design, production, and environmental assessment within a single decision-making structure.

State of the art | In the AEC sector, complexity does not only derive from the multiplicity of components, but also from the network of relationships that constitutes the project-system. From this perspective, the potential of DfMA is now widely recognised; one only has to think of the role that Waqar et alii (2025) recognise for Modern Methods of Construction (MMC), the increasing focus of the RIBA Plan of Work on the integration of design and construction phases (RIBA, 2020), as well as the platform concept developed by Bryden Wood (2021), which proposes standardisation based on interfaces, rules and processes. Nevertheless, the wider dissemination of such strategies remains limited by several structural obstacles: the isolation of systems, the fragmentation of competences and, above all, the lack of standardised processes that link design and production in a continuous and verifiable manner.

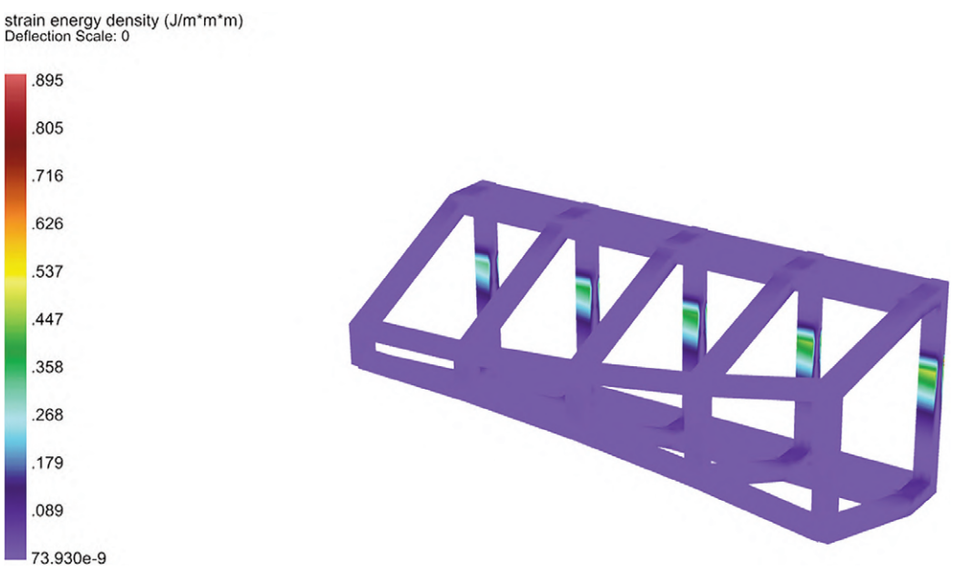
In this scenario, the automotive sector is identified as a source of technology transfer, as an industry characterised by high levels of systemic complexity (Morbiducci, Polverino and Battaglia, 2023). In particular, complexity management is driven by structured product development logic, progressive validation tools (with well-defined phases and checkpoints) and manufacturing- and assembly-oriented methods that integrate performance requirements, production constraints and environmental objectives. The interest in this type of know-how does not lie in the transposition of tolerances or production volumes from the automotive industry, but rather in the possibility of transferring methodologies and strategies capable of structuring and managing the transition to the industrial scale of components (Giovanardi et alii, 2024).

If the façade is interpreted as an integrated system, its industrialisation must be based on a 'second-level' standardisation, focusing on process logics: interfaces, assembly sequences, testing criteria and end-of-life scenarios. Principles derived from industrial management also include reducing the number of components and configuring them into more easily assembled macro-components. As with buildings, the architecture of a car includes structural components that constitute the skeleton and non-structural elements that serve aesthetic and protective functions (Samad and George, 2022). Following this distinction, the integration of structure and envelope follows the logic of Body-in-White (BIW): the whole of the load-bearing body (Fig. 1) and its main substructures are conceived as a geometric and performance reference for all subsequent parts (Onat, 2025). This logic constitutes a useful conceptual reference to reduce fragmentation, facilitate assemblability and control convergence between performance requirements and the identity dimension of the envelope (Manni and Valzano, 2023).

Operationally, new product development in the automotive industry is governed by a multi-stage process that integrates design and engineering. The stage-gate process is a recurring model divided into distinct phases, each culminating in a control point at which critical progress decisions are made on the basis of verifiable criteria (Ettlie and Elsenbach, 2007). The critical transposition of logics with well-defined phases and checkpoints along with DfMA-oriented methods, enables feasibility assessments to be anticipated and variations to be reduced. GRC façade systems are particularly suited to this method, as they pose the design question between geometric complexity, component standardisation and the need for integration between design and production.

GRC is an alkali-resistant glass-fibre-reinforced cement composite used in architecture to create thin, relatively light elements compared to traditional concrete, with good surface quality and wide formal freedom (Ahmad et alii, 2022). Its widespread use in the building envelope is mainly linked to the possibility of producing panels with reduced thickness, suitable for cladding and protection functions, with controlled finishes and aesthetic variability (Bentur and Mindess, 2006).

In contemporary practice, GRC finds application in different types of systems: (a) non-load-bearing cladding panels for ventilated façades, in which the panel forms the external 'skin' and works in combination with a metal substructure and functional layers behind; (b) prefabricated insulated panels (sandwich or composite), in which the GRC integrates or cooperates with an insulating layer and, sometimes, with a second facing or support structure, in order to combine finish, protection and thermo-hygrometric performance; (c) integral or semi-integral wall systems, in which the GRC is not just a cladding but participates, to varying de-



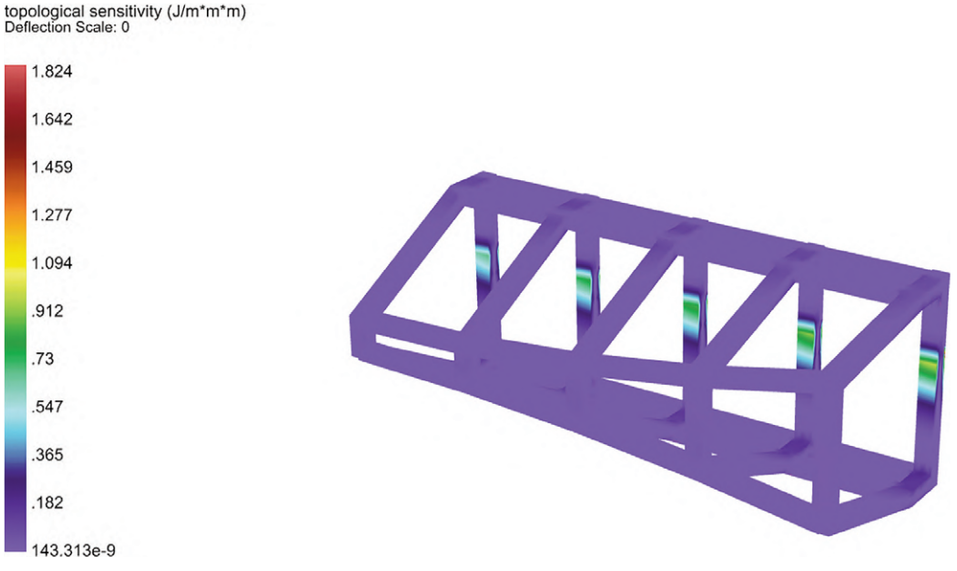


Fig. 8 | Strain Energy Density Map (credit: the Authors, 2026).

Fig. 9 | Topological Sensitivity (credit: the Authors, 2026).

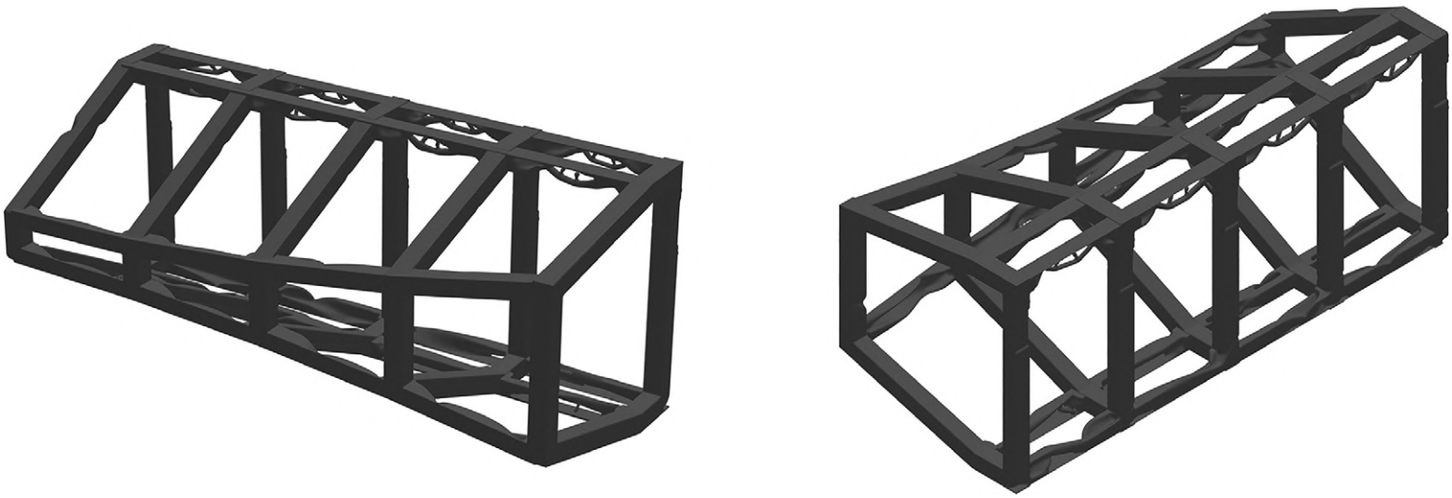


Fig. 10 | Topology optimisation (credit: the Authors, 2026).

grees, in the composition of a more complex closure element, including connection devices, stiffeners, arrangements and details for openings, joints and edges. As shown in Figure 2, it is possible, to a first approximation, to distinguish a progression from planar panels to simple curved panels to double-curved panels and free geometries (Henriksen, Lo and Knaack, 2015). The complexity increases, however, especially when the geometry incorporates local features that transform the panel into a three-dimensional interface device (Bishop and Wilson, 2011). In such conditions, the panel is no longer a mere cladding element, defined only by the configuration of the outer surface, but a component that must simultaneously coordinate aesthetic and performance requirements with the constraints of production (moulding strategies, demoulding, tolerances), handling and assembly (gripping points, positioning, adjustment and assembly sequence).

The research takes as its reference a GRC panel system of the 'stud frame' type (Fig. 3), composed of a monolithic GRC skin coupled with a prefabricated metal frame, which constitutes the load-bearing substructure and represents the interface between the envelope and the main structure of the building (Purslow, 1990). The hierarchy of the components can be described as: (a) GRC skin, without internal ribs and stiffened above all by means of a perimeter flap which is also useful for sealing the joints; (b) back metal frame made up of uprights and beams (often in hollow section profiles); (c) skin-frame connection system based on two families of anchorages, flexible 'L'-shaped and load-bearing.

In the frame system, the GRC skin serves as the cladding, while overall rigidity and geometric control are entrusted to the back frame, which consists of standard metal profiles (mullions and beams in a grid, often with a regular pitch). This configuration is effective when the objective is to produce and install large flat surfaces with a clear interface with the primary structure. However, in the case of curvatures, the back-frame model has an inherent limitation: to follow a non-planar geometry, the frame must be adapted. The use of standardised elements, while offering advantages in terms of scalability, entails a significant material oversizing of the system, as the substructure requires a material quantity that is not fully optimised. Hence, there is a need to explore a methodology that reduces mass while keeping the interface points and assembly logic unchanged.

In the context of structural interfaces between GRC façade panels and the building's primary structure, the use of Directed Energy Deposition (DED) technologies, in particular Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM), allows the production of metal components with a geometric freedom not constrained by the limits of rolled profiles. Several studies have demonstrated the feasibility of fabricating large-scale structural elements by means of WAAM, such as in the case of the MX3D bridge in Amsterdam (Laghi et alii, 2023), as well as the effectiveness of hybrid approaches that combine additively manufactured parts with elements made using traditional technologies (Raspall et alii, 2025). In particular, Laghi, Savino and Gasparini (2025) propose an 'integrated structural optimisation' approach (Fig. 4) that integrates topological optimisation, WAAM production constraints and numerical verification. From an environmental impact perspective, the comparison between hot-rolled steel beams and WAAM components showed a reduction in CO_2 emissions, provided that a mass saving of at least 50% is achieved through the use of topological optimisation techniques (Laghi, Savino and Gasparini, 2025).

Research methodology and definition of the framework | In developing the framework, the research identifies four in-depth plans, selected for their relevance to the following themes: management of geometric complexity, definition of the interface between skin and structure, application of DfMA logics, and integration between optimisation, manufacturing and environmental assessment. The automotive sector, and in particular the BIW logic, represents the first semantic area from which to transfer interface strategies, albeit in the presence of profoundly different materials, timeframes and levels of uniqueness from those of the AEC sector. The field of GRC façade systems, on the other hand, shows that the material can support high geometric complexity and also highlights that the critical node is not the skin itself, but rather the substructure and the resolution of the interface with the supporting structure. And it is at the interface where WAAM technology is located, where complexity is most concentrated and where targeted additive manufacturing can be methodologically and economically more efficient than extensive application. Finally, studies that integrate topological optimisation, structural simulation and material efficiency, such as the hybrid approach (Laghi et alii, 2023), provide an important methodological reference for linking mass reduction, manufacturability and environmental impact.

The framework proposed in Table 1 is conceived as a transferable tool beyond the objectives of this study: although it refers to specific technical solutions, it is based on a working structure that can be adapted to different building systems, with the appropriate modifications. It is possible to modulate the content and tools of each phase according to the context, while keeping the decision-making architecture unchanged and ensuring a progressive integration of the engineering component, supported by checkpoints that regulate transitions between phases. The framework is used to manage the different components of the façade macro-component: external skin, substructure, connection system, joints and functional stratigraphy, as well as logistics, installation, maintenance and end-of-life scenarios. Within this methodological framework, the specific contribution of this study focuses on mass reduction and LCA evaluation.

In the initial 'Concept Evaluation' phase, the framework involves defining the design objectives and formalising the geometric complexity of the panel and structural interfaces. The design domain, architectural and functional requirements and the first Key Performance Indicators (KPIs) of manufacturability and assembly are defined. The 'Concept Definition and Feasibility' phase introduces a parametric reference model consisting of a GRC panel and a frame, both characterised by a high degree of geometric complexity, against which the selective integration of WAAM technology is envisaged. In this phase, preliminary finite element analyses are performed, constraints for topological optimisation are defined, and the environmental assessment system (LCA) is set up, including functional units, system boundaries and indicators.

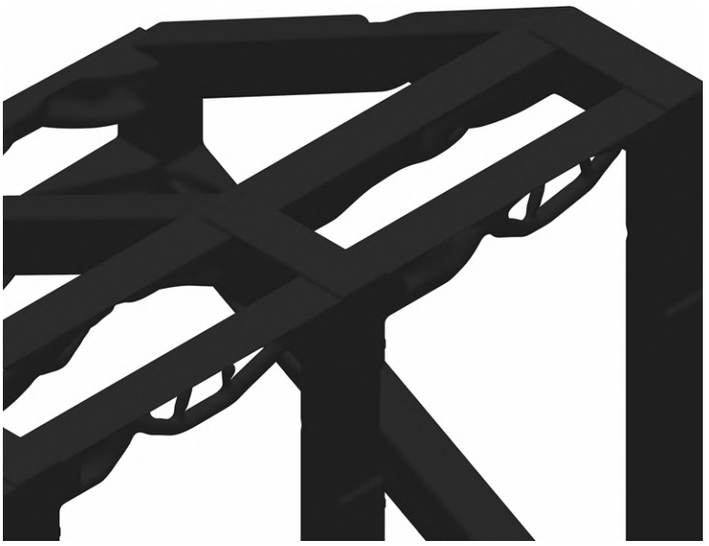


Fig. 11 | Topology optimisation detail (credit: the Authors, 2026).

The validation of technical, production and environmental feasibility is the criterion for access to the subsequent phases. The 'Development' phase comprises the framework's engineering core. Here, the digital model is consolidated, topological optimisation strategies are applied to the substructure and the hybrid architecture integrating WAAM and standardised elements is defined. The performance of the optimised solution is compared with that of the reference configuration in structural, material and environmental terms by integrating Design for Disassembly (DfD) strategies. Validation takes place through prototyping, verification of mass reduction, structural behaviour, and improvement of LCA indicators. After the development phase, the process enters the industrialisation phase.

The 'Tooling and Process Validation' phase verifies the repeatability of the production workflow by checking cycle times, dimensional tolerances and energy consumption. At the same time, the LCA analysis is updated using real process data to validate the environmental assumptions made in the previous phases. This is followed by the 'Pre-Series' phase, in which a small series of panels is produced and tested under operating conditions, to evaluate installation, disassembly, damage and material separability. This phase allows the system's robustness to be validated and DfD strategies to be consolidated.

Finally, the 'Ramp-Up' phase is geared towards stabilising production and environmental KPIs, defining final interface standards and verifying system scalability. The focus shifts from the single optimised configuration to the process's ability to replicate itself across different geometries, maintaining constant quality and performance, and ensuring process control.

A distinguishing feature of the framework is treating component development as part of a controlled production line rather than as an isolated outcome of a discontinuous sequence of operations. This allows not only the geometric and structural configuration of the component to be considered from the initial stages, but also the optimisation of movement, prefabrication, transport and installation, thus reducing the fragmentation typical of the AEC supply chain.

Application of the framework to the case study | Over the past two decades, topological optimisation has established itself as one of the most powerful computational tools for advanced structural design, enabling the optimal distribution of material within a design domain according to specific performance constraints, such as minimising structural yielding or limiting the volume fraction (Takezawa, Nishiwaki and Kitamura, 2010).

The interest in 'lightweight' design is now placed within a broader framework of environmental sustainability: the reduction of structural mass leads to decreased consumption of primary materials and reduced energy loads during the production and use phases. Most studies have focused on single-material optimisation of structural beams. Most studies have focused on single-material optimisation of structural beams (Damtsas et alii, 2025). In the context of metal additive manufacturing, particularly WAAM, this relationship between topological optimisation and sustainability has become increasingly relevant. This study proposes integrating topological optimisation techniques and WAAM processes within the described framework, aiming to develop GRC-WAAM hybrid structural components that significantly reduce mass compared to standardised metal frames, improve the material efficiency of the interface, and optimise stress distribution along load paths. This mass reduction is part of an approach whose environmental benefits can be measured by reduced emissions throughout the component's life cycle.

The application of the framework starts with a basic model, understood as a structural configuration that is technically feasible using current construction techniques and consistent with the system's construction logic. The section shown in Figure 5 illustrates a typical configuration in which the façade engages a concrete slab and a perimeter kerb. In this type of system, the geometry of the section may vary according to architectural choices and design conditions: to manage this geometric variability, a parametric model (Figg. 6, 7) was developed using Grasshopper to control the morphological parameters of the façade interface, such as curvature, inclination and surface continuity, while keeping the hierarchy of the system's components unchanged.

The GRC envelope for the macro-component studied has a total surface area of approximately 6 m^2 and a nominal thickness of 24 mm, for a volume of approximately 0.14 m^3. Assuming an average density of 2,400 kg/m^3, the mass of the panel is between 336 and 346 kg, corresponding to a self-weight of approximately 3.3-3.4 kN. This value represents the main load transferred from the outer skin to the metal substructure. Based on the parametric model, a structural simulation analysis was then conducted using the Intact Simulation calculation environment, which is integrated into the same parametric workflow.

The structural domain was discretised using a voxel representation, suitable for a preliminary concept phase and intended to identify the main action transfer paths within the system. Two equivalent loads were applied in the model: a vertical gravitational load of 3.3 kN, representative of the panel's own weight in GRC, and a horizontal load of 4.7 kN, derived from a simplified wind pressure applied to the surface of the macro-component.

The analysis enabled calculation of various tension and deformation fields; among these, the deformation energy density (Fig. 8) was used as the primary parameter for interpreting the system's structural behaviour. The topological sensitivity (Fig. 9), on the other hand, shows the regions of greatest structural significance. This information forms the basis for the topological optimisation phase.

Results and comparison between basic model and optimised configuration | From a quantitative point of view, the initial structural volume of 0.1716 m^3 was reduced to 0.137 m^3, corresponding to an overall material reduction of approximately 20% (Figg. 10, 11).

Table 2 summarises the main physical parameters of the comparison between the reference model and the optimised configuration, highlighting the effects of the mass reduction on the metal substructure. Previous studies indicate that values between 30% and 50% generally allow for realistic structural configurations while maintaining load-path continuity (Bendsøe and Sigmund, 2004). In the present study, a lower volume reduction than generally reported in the literature was adopted. This conservative choice does not derive from a

definitive structural calibration and, for this reason, was introduced as an exploratory step in the preliminary phase of the proposed methodological framework, with the aim of investigating the system's mass-reduction potential and identifying the main action transfer paths.

A preliminary environmental assessment was conducted by means of LCA analysis to compare the embedded climate impact of the metal interface substructure in two configurations of the same macro-component: (1) a reference configuration, corresponding to the non-optimised component; (2) a configuration derived from a topological optimisation, considered producible through WAAM. The GRC cladding is considered unchanged between the alternatives (336 kg in both cases) and therefore excluded from the main comparison on the substructure, as it does not discriminate against the target in the initial phase of the study. The analysis is set up according to the principles and requirements of ISO 14040 and ISO 14044 (ISO 2006a; 2006b) and is reported as a cradle-to-gate study, consistent with the modular A1–A3 approach of EN 15804 (CEN, 2019) and the methodological framework of EN 15978 (CEN, 2011).

The model is implemented in SimaPro Faculty 10 using the ecoinvent 3 database, with the cut-off system and the LCIA ReCiPe 2016 Midpoint (H) method. The indicator considered is exclusively the Global Warming Potential (GWP, in kg-CO_2eq). The Functional Unit (FU) is defined as an interface macro-component per panel, measuring 2.4 m × 1 m. The comparison assumes functional equivalence between the two alternatives, although the optimised configuration has not undergone full structural validation. At this stage, LCA is used as an analysis tool to verify the plausibility of the trade-off between reducing mass and increasing process energy. The inventory used is limited to the dominant GWP contributors. For the reference configuration, the process is modelled as an input of 1,347 kg of low-alloy steel. In contrast, the optimised configuration is modelled with an input of 1,076 kg of low-alloy steel and 150 kWh of process electricity, assumed to be the energy required for WAAM deposition. In both cases, the result is defined as one unit of the macro-component.

The datasets used are: Steel, low-alloyed 'GLO | market for steel, low-alloyed | Cut-off', S for steel and 'Electricity', medium voltage {RER}' for process electricity. The perimeter, therefore, includes: (a) the production of the metal material (A1–A3 for steel); (b) the consumption of process electricity for WAAM deposition. Excluded are: site transport and installation (A4–A5); use, maintenance, and replacement (B); end-of-life (C); and credits beyond the system boundaries (D); and auxiliary consumables not yet robustly quantified, such as protective gas, tools, or post-processing.

The results shown in Table 3 indicate that the GWP of the baseline configuration is 2,783.45 kgCO_2eq/FU, while that of the optimised configuration, achievable through WAAM, is 2,273.60 kgCO_2eq/FU, with an absolute reduction of about 509.85 kgCO_2eq and a relative reduction of about 18.3%. In terms of mass, the metal frame reduction is 271 kg, or about 20%.

In the second analysis, in order to contextualise the effect of the reduction of the metal substructure with respect to the entire macrocomponent, an additional estimate was also developed by including the cladding, whose contribution was assumed to be 336 kg/FU in both alternatives, ensuring the neutrality of the comparison with respect to this component. In the absence of a specific dataset for GRC panels in the selected database, the cladding was modelled using the dataset 'fibre cement facing tile', large format {RoW} | fibre cement tile production, large format | Cut-off, S, adopted as a technologically consistent proxy for fibre cement facing elements.

Two aggregate processes were then defined: 1) full baseline configuration, consisting of 1,347 kg of low-alloy steel and 336 kg of coating; 2) full optimised configuration, consisting of 1,076 kg of low-alloy steel, 336 kg of coating and 150 kWh of process electricity for WAAM deposition. The results show that the GWP of the complete macrocomponent decreases from 3,259.55 kgCO_2eq/FU for the baseline configuration to 2,749.69 kgCO_2eq/FU for the optimised configuration, corresponding to an absolute reduction of about 509.85 kgCO_2eq and a relative reduction of about 15.6%.

Compared to the results from the substructure alone, the inclusion of the cladding results in a smaller percentage reduction, while the absolute benefit remains unchanged. Compared to the metal substructure, cladding contributes around 476 kgCO_2eq/FU, making it the second-largest contributor to the overall impact. The analysis of the contributions confirms that steel production remains the main source of overall GWP, accounting for 81% to 85%, while cladding contributes about 15-17%; the contribution of process electricity associated with WAAM is instead marginal at the macro-component level. Since this is a preliminary estimate based on a representative dataset of GRC cladding, the results should be interpreted as indicative and primarily intended to make explicit the relative weight of the substructure with respect to the complete component.

LCA studies of WAAM technologies frequently adopt narrow system boundaries, often gate-to-gate, to isolate the contributions of the most relevant process factors (Shah et alii, 2023). The objective is not the complete quantification of the product life cycle, but rather the understanding of the trade-offs between efficient material use and process energy requirements. Compared to this ap-

Parameter	Baseline	Optimized
Frame mass (kg)	1,347	1,076
GRC mass (kg)	336	336
Total mass with GRC (kg)	1,683	1,412
Metal volume (m³)	0.1716	0.1371
Volume fraction (–)	1.00	0.80

Tab. 2 | Comparison of the main physical parameters between the baseline model and the optimised configuration (credit: the Authors, 2026).

Tab. 3 | Inventory and GWP results for the metal substructure and the complete macrocomponent (credit: the Authors, 2026).

Tab. 4 | Sensitivity analysis: effect of WAAM electricity demand on GWP, steel mass set at 1,076 kg/FU (credit: the Authors, 2026).

	INVENTORY			RESULTS	
Scenario	GRC cladding (kg/FU)	Low-alloyed steel (kg/FU)	WAAM electricity (kWh/FU)	GWP substructure only ($kgCO_2eq/FU$)	GWP complete component ($kgCO_2eq/FU$)
Baseline (reference substructure + cladding)	336	1,347	–	2,783.45	3,259.55
Optimized (topology-optimized substructure + WAAM + cladding)	336	1,076	150	2,273.60	2,749.69

Note: the GWP of the complete component includes the constant contribution of the GRC cladding, modelled through a fibre cement facing tile proxy dataset.

Scenario	GRC cladding (kg/FU)	Low-alloyed steel (kg/FU)	WAAM electricity (kWh/FU)	GWP substructure only (kg CO_2eq/FU)	GWP complete component (kg CO_2eq/FU)
WAAM nominal	336	1,076	150	2,273.60	2,749.69
WAAM +50% electricity	336	1,076	225	2,298.67	2,774.76
WAAM +100% electricity	336	1,076	300	2,323.74	2,799.83

proach, the present study adopts a slightly broader scope, including the electricity process but also steel production. This choice is consistent with the fact that the comparison does not concern only two deposition variants, but two configurations of the same component with different metal masses; in this case, the most important variable is not the additive process itself, but the relationship between mass reduction and deposition energy load.

The literature on WAAM also shows that the modelling of capital equipment and process infrastructure is often excluded or simplified, as the allocation of impacts on equipment life, productivity, and utilisation rates introduces a high degree of uncertainty (Spreafico, Kokare and Godina, 2026). Similarly, for components still under development, certain phases, such as transport, installation, use, and end-of-life, are deferred to future development, when geometries, performance and deployment scenarios are more stabilised. In this sense, the choice to present the LCA analysis limited to A1–A3 is methodologically consistent with the current maturity of the case study and the positioning of the contribution in the 'Concept Definition and Feasibility' phase.

To verify the sensitivity of the result with respect to possible increases in the energy requirements of additive deposition, two additional scenarios were defined, keeping the steel mass of the optimised configuration constant (1,076 kg/FU) and varying only the process electricity consumption to 225 kWh/FU and 300 kWh/FU (Tab. 4). The results show that the GWP of the optimised substructure alone increases from 2,273.60 $kgCO_2eq$/FU in the nominal scenario (150 kWh/FU) to 2,298.67 $kgCO_2eq$/FU in the +50% energy scenario and to 2,323.74 $kgCO_2eq$/FU in the +100% energy scenario. If the comparison is extended to the full macro-component, the GWP increases from 2,749.69 $kgCO_2eq$/FU in the nominal scenario to 2,774.76 kg CO_2eq/FU in the +50% energy scenario and to 2,799.83 $kgCO_2eq$/FU in the +100% energy scenario. Although GWP increases consistently with increasing process energy, the optimised configuration remains environmentally preferable to the baseline in all scenarios analysed. This confirms that the main driver of climate impact is steel production, while additive deposition energy is a secondary parameter. The observed environmental benefit is therefore mainly due to the reduction in the component's metal mass.

To identify the conditions under which the optimised solution is environmentally preferable, a simple threshold condition is defined based on the balance between mass saved and additional energy:

$$(m_{baseline} - m_{optimized}) \times EF_{steel} > E_{WAAM} \times EF_{el}$$

where: $m_{baseline} - m_{optimized} = 271$ kg; EF_{steel} is the emission factor associated with the steel dataset; E_{WAAM} is the process electricity consumption; EF_{el} is the emission factor associated with the adopted electricity dataset.

In the case study analysed, the results show that reducing steel by 271 kg is sufficient to maintain the GWP-preferable optimised configuration even with a doubling of process electricity from 150 to 300 kWh. The result thus indicates that, within the adopted system boundaries, the climatic advantage of the optimised solution is robust to plausible variations in the deposition energy load. The threshold should not be interpreted as an intrinsic property of the WAAM, but rather as a methodological condition: the additive process is only environmentally advantageous when it enables a mass reduction that compensates for the additional energy required.

Conclusions, research limitations, and future developments | The research explored the potential for technology transfer between the automotive and AEC sectors and proposed a methodological framework based on DfMA principles. In this perspective, the application phase of the contribution has as its main objective the definition of a process structure capable of integrating, in a progressive and verifiable manner, architectural requirements, production constraints, assembly criteria, environmental assessments and industrialisation hypotheses, rather than the complete validation of the optimised component.

From the point of view of limitations, functional equivalence between the reference configuration and the optimised one is assumed at a conceptual level and requires verification through complete structural analyses or physical prototypes. The manufacturability of WAAM is still based on the literature and has not been verified with respect to deposition constraints, tolerances, finishing, process times and certification requirements.

The preliminary LCA analysis shows that the configuration obtained by topological optimisation has a lower GWP than the reference configuration. This result, mainly associated with the reduction of the metal mass of the frame, must however be read in the light of certain limitations: the functional equivalence between the reference and optimised configuration is assumed at the concept level and not yet validated through complete structural verifications; the perimeter limited to A1–A3 excludes potentially relevant contributions such as transport, installation, use, maintenance, disassembly and end-of-life; finally, the model does not yet include process consumables, protective gas or any post-processing.

In terms of adoption, the deployment of this manufacturing-oriented approach also encounters structural barriers in the AEC sector, including the still-high costs of metal additive technologies, which hinder their integration; limited standardisation; evolving testing and certification procedures; and fragmented supply chains. In addition to these critical issues, there are cultural and organisational obstacles to overcoming the separation between design, simulation and production, as well as information obstacles due to the limited availability of reliable data on actual process consumption, end-of-life scenarios, and measurable environmental benefits in the early stages of decision-making.

In terms of transferability, the combination of parametric modelling, structural simulation, topological optimisation and LCA analysis has shown how it is possible to steer design decisions towards greater material efficiency as early as the 'Concept Definition and Feasibility' phase, placing the study in line with the objectives of SDG 9. In a complementary way, the research intersects with SDG 12 through reductions in the component's mass, a focus on material efficiency, the use of LCA analysis as decision support, and the integration of a logic oriented towards Design for Disassembly and controlled prefabrication. More indirectly, the study dialogues with SDG 13, as the reduction of GWP is a preliminary indicator of climate benefits, and with SDG 11, as the innovation of envelope systems can, in a mediated way, contribute to a higher-quality, more maintainable, and more sustainable built environment.

Future developments should therefore focus on the structural validation of the optimised component, the verification of its actual manufacturability through WAAM, and the extension of the environmental analysis to further inventory contributions and steps A4–A5, B and C. Overall, the research shows that the environmental potential of the optimised solution does not depend on the adoption of additive technology alone, but rather on its ability to make more material-efficient configurations producible. Rather than asserting the superiority of a technology, the study proposes a methodological line based on a systemic approach, in which the DfMA allows the role of design to remain central and to address the complexity of the component on several levels: geometric, technological, productive and environmental.

Acknowledgements

The study is part of an ongoing research project developed at the Department of Architecture, Construction Engineering and the Built Environment (DABC) of the Politecnico di Milano (Italy), within the Material Balance research group, coordinated by Prof. I. M. Paoletti, and conducted in collaboration with Pininfarina S.p.A. The work presented corresponds to a phase of G. Conti's Executive PhD course, dedicated to the transfer of DfMA strategies from the automotive sector to the AEC sector. The contribution is the result of a shared reflection among the Authors; however, regarding the attribution of individual contributions, I. M. Paoletti provided overall scientific supervision, while G. Conti led and developed the sections related to technological transfer, the definition of the conceptual and methodological framework, parametric modelling and topological optimisation of the case study, insights into GRC technology, and the application of DfMA strategies derived from the automotive sector; G. Castellano contributed to environmental modelling and the definition of the façade system; F. Pradella contributed to DfMA strategies and digital manufacturing solutions.

References

Ahmad, J., González-Lezcano, R. A., Majdi, A., Ben Kahla, N., Deifalla, A. F. and El-Shorbagy, M. A. (2022), "Glass fibers reinforce concrete – Overview on mechanical, durability and microstructure analysis", in *Materials*, vol. 15, issue 15, article 5111, pp. 1-23. [Online] Available at: doi.org/10.3390/ma15155111 [Accessed 31 March 2026].

Alkhazaleh, R., Mykoniatis, K. and Alahmer, A. (2022), "The success of technology transfer in the Industry 4.0 era – A systematic literature review", in *Journal of Open Innovation | Technology, Market, and Complexity*, vol. 8, issue 4, article 202, pp. 1-18. [Online] Available at: doi.org/10.3390/joitmc8040202 [Accessed 31 March 2026].

Bendsøe, M. P. and Sigmund, O. (2004), *Topology Optimization – Theory, Methods and Applications*, Springer, Berlin. [Online] Available at: doi.org/10.1007/978-3-662-05086-6 [Accessed 31 March 2026].

Bentur, A. and Mindess, S. (2006), *Fibre Reinforced Cementitious Composites*, CRC Press, Boca Raton. [Online] Available at: doi.org/10.1201/9781482267747 [Accessed 8 April 2026].

Bishop, E. and Wilson, J. (2011), "Concept to realisation – GRC and complex facades", in *Proceedings of the GRCA Congress 2011, Istanbul, Turkey, September 4-8, 2011*, Glassfibre Reinforced Concrete Association, Bingley, pp. 1-15. [Online] Available at: grca.org.uk/pdf/congress-2011/21%20Concept%20to%20Realisation%20GRC%20and%20Complex%20Facades.pdf [Accessed 31 March 2026].

Damtsas, E., Nieto Jiménez, A., Konstantatou, M., Herrmann, M. and Grigoriadis, K. (2025), "The design, fabrication, and structural and embodied carbon analysis of the world's first manufactured topologically optimised multimetal I-beam", in *Architectural Intelligence*, vol. 4, issue 1, article 23, pp. 1-22. [Online] Available at: doi.org/10.1007/s44223-025-00100-8 [Accessed 31 March 2026].

de Matos Camarinha, R., Goulding, J. and Peter, C. (2023), "Construction sector transformation – Developing a new learning paradigm", in Gomes Correia, A., Azenha, M., Cruz, P. J. S., Novais, P. and Pereira, P. (eds), *Trends on Construction in the Digital Era – ISIC 2022 – Proceedings of ISIC 2022, Guimarães, Portugal, September 6-9, 2022*, Lecture Notes in Civil Engineering, vol. 306, Springer, Cham, pp. 369-379. [Online] Available at: doi.org/10.1007/978-3-031-20241-4_25 [Accessed 31 March 2026].

Ettlie, J. E. and Elsenbach, J. M. (2007), "Modified Stage-Gate® regimes in new product development", in *Journal of Product Innovation Management*, vol. 24, issue 1, pp. 20-33. [Online] Available at: doi.org/10.1111/j.1540-5885.2006.00230.x [Accessed 31 March 2026].

European Committee for Standardization (2019), *EN 15804 – Sustainability of construction works – Environmental product declarations – Core rules for the product category of construction products*. [Online] Available at: standards.iteh.ai/catalog/standards/cen/c98127b4-8dc2-48a4-9338-3e1366b16669/en-15804-2012a2-2019 [Accessed 31 March 2026].

European Committee for Standardization (2011), *EN 15978 – Sustainability of construction works – Assessment of environmental performance of buildings – Calculation method*. [Online] Available at: standards.iteh.ai/catalog/standards/cen/62c22cef-5666-4719-91f9-c21cb6aa0ab3/en-15978-2011 [Accessed 31 March 2026].

Giovanardi, M., Castellan, C., La Rosa, M., Pavlovic, A. and Pracucci, A. (2024), "Progettare BIPV – Strategie per gestire la complessità del fotovoltaico integrato in facciata | Designing BIPV – Strategies for managing complexity in the integration of photovoltaics in facades", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 16, pp. 186-193. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/16152024 [Accessed 31 March 2026].

Henriksen, T., Lo, S. and Knaack, U. (2015), "An innovative approach to manufacture thin-walled glass fibre reinforced concrete for tomorrow's architectural building envelopes with complex geometries", in *Journal of Building Engineering*, vol. 4, pp. 189-199. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.jobe.2015.09.006 [Accessed 31 March 2026].

Höweler, E. (2025), *Design for Construction – Tectonic Imagination in Contemporary Architecture*, Routledge, London. [Online] Available at: doi.org/10.4324/9781003434559 [Accessed 31 March 2026].

ISO – International Organization for Standardization (2006a), *ISO 14040:2006 – Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework*. [Online] Available at: iso.org/standard/37456.html [Accessed 31 March 2026].

ISO – International Organization for Standardization (2006b), *ISO 14044:2006 – Environmental management – Life cycle assessment – Requirements and guidelines*. [Online] Available at: iso.org/standard/38498.html [Accessed 31 March 2026].

Laghi, V., Palermo, M., Bruggi, M., Gasparini, G. and Trombetti, T. (2023), "Blended structural optimization for wire-and-arc additively manufactured beams", in *International Journal of Steel Structures*, vol. 8, pp. 381-392. [Online] Available at: doi.org/10.1007/s40964-022-00335-1 [Accessed 31 March 2026].

Laghi, V., Savino, E. and Gasparini, G. (2025), "Reduction of the environmental impact of complex-shaped steel joints through topology optimization and large-scale metal 3D printing", in *Results in Engineering*, vol. 27, article 105610, pp. 1-14. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.rineng.2025.105610 [Accessed 31 March 2026].

Manni, V. and Valzano, L. S. (2023), "Modularità e architettura adattiva – Una strategia per la gestione di sistemi d'involucro complessi | Modularity and adaptive architecture – A strategy for managing complex envelope systems", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 14, pp. 134-151. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/14112023 [Accessed 31 March 2026].

Morbiducci, R., Polverino, S. and Battaglia, C. (2023), "Stampa 4D per componenti costruttivi modulari – Applicazioni e principali sviluppi | 4D printing for modular construction components – Applications and main developments", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 14, pp. 182-193. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/14152023 [Accessed 31 March 2026].

Onat, M. (2025), "Investigation of changes in body-in-white components and their impact during the transition from internal combustion engine vehicles to electric vehicles", in *International Journal of Automotive Engineering and Technologies*, vol. 14, issue 2, pp. 123-141. [Online] Available at: doi.org/10.18245/ijaet.1630727 [Accessed 31 March 2026].

Osello, A., Del Giudice, M., Donato, A. J. and Fratto, A. (2024), "Verso la Neutralità Climatica – Il ruolo chiave del Digital Twin nell'Industria 5.0 | Towards Climate Neutrality – The key role of the Digital Twin in Industry 5.0", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 15, pp. 276-285. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/15222024 [Accessed 8 April 2026].

Palumbo, E., Mazzei, I., Perpetua, M. and Pomponi, F. (2025), "Impatti ambientali e sociali nel ciclo vita per una progettazione a basso carbonio | Environmental and social life cycle for low-carbon design", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 18, pp. 294-303. [Online] Available at: doi.org/10.69143/2464-9309/18172025 [Accessed 31 March 2026].

Paoletti, I. (2003), *Una finestra sul trasferimento – Tecnologie innovative per l'architettura*, Libreria Clup, Milano.

Purslow, G. J. (1990), "Stud frame cladding – A technical appraisal", in *Construction and Building Materials*, vol. 4, issue 1, pp. 11-15. [Online] Available at: doi.org/10.1016/0950-0618(90)90013-Q [Accessed 31 March 2026].

Raspall, F., Araya, S., Pazols, M., Valenzuela, E., Castillo, M. and Benavides, P. (2025), "Wire arc additive manufacturing for widespread architectural application – A review informed by large-scale prototypes", in *Buildings*, vol. 15, issue 6, article 906, pp. 1-21. [Online] Available at: doi.org/10.3390/buildings15060906 [Accessed 31 March 2026].

RIBA – Royal Institute of British Architects (2020), *RIBA Plan of Work 2020 Overview*, RIBA, London. [Online] Available at: riba.org/media/syneeeto/2020ribaplanofworkoverviewpdf.pdf [Accessed 8 April 2026].

Richard, R.-B. (2017), "Industrialized building system categorization", in Smith, R. E. and Quale, J. D. (eds), *Offsite Architecture – Constructing the future*, Routledge, London, pp. 3-20. [Online] Available at: doi.org/10.4324/9781315743332-1 [Accessed 31 March 2026].

Samad, M. F. A. and George, K. Y. (2022), "Application of Design for Manufacturing and Assembly (DFMA) method to vehicle door design", in *Defence S and T Technical Bulletin*, vol. 15, issue 1, pp. 34-41. [Online] Available at: eprints.utem.edu.my/id/eprint/26996/ [Accessed 31 March 2026].

Shah, I. H., Hadjipantelis, N., Walter, L., Myers, R. J. and Gardner, L. (2023), "Environmental life cycle assessment of wire arc additively manufactured steel structural components", in *Journal of Cleaner Production*, vol. 389, article 136071, pp. 1-14. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136071 [Accessed 31 March 2026].

Smith, R. E., Elliott, J. W. and Grosskopf, K. (2017), "Offsite construction in education – A survey of prefabrication in design and construction academia", in Smith, R. E. and Quale, J. D. (eds), *Offsite Architecture – Constructing the future*, Routledge, London, pp. 128-138. [Online] Available at: doi.org/10.4324/9781315743332-8 [Accessed 31 March 2026].

Spreafico, C., Kokare, S. and Godina, R. (2026), "Prospective life cycle assessment of future wire arc additive manufacturing deposition process for large-scale steel parts", in *Environmental Impact Assessment Review*, vol. 116, article 108111, pp. 1-17. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.eiar.2025.108111 [Accessed 31 March 2026].

Takezawa, A., Nishiwaki, S. and Kitamura, M. (2010), "Shape and topology optimization based on the phase field method and sensitivity analysis", in *Journal of Computational Physics*, vol. 229, issue 7, pp. 2697-2718. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.jcp.2009.12.017 [Accessed 31 March 2026].

UN – United Nations (2015), *Transforming our World – The 2030 Agenda for Sustainable Development*. [Online] Available at: sdgs.un.org/2030agenda [Accessed 31 March 2026].

Vibæk, K. S. (2017), "System structures – A theory of industrialised architecture", in Smith, R. E. and Quale, J. D. (eds), *Offsite Architecture – Constructing the future*, Routledge, London, pp. 21-36. [Online] Available at: doi.org/10.4324/9781315743332-2 [Accessed 31 March 2026].

Waqar, A., Al Hajj, F., Danish, M., Khan, M. B. and Houda, M. (2025), "Evaluating the influence of modern construction methods on sustainable construction success", in *Cleaner and Responsible Consumption*, vol. 19, article 100327, pp. 1-14. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.clrc.2025.100327 [Accessed 9 April 2026].

Wood, B. (2021), *Data Driven Infrastructure – From Digital Tools to Manufactured Components*. [Online] Available at: cdbb.cam.ac.uk/system/files/documents/data_driven_infrastructure_screen.pdf [Accessed 8 April 2026].

AGATHÓN – International Journal of Architecture, Art and Design | n. 19 | 2026 | pp. 294-309
ISSN print: 2464-9309 – ISSN online: 2532-683X | doi.org/10.69143/2464-9309/19172026

ARTICLE INFO

Received 16 March 2026
Revised 27 April 2026
Accepted 28 April 2026
Published 30 June 2026

PASSAPORTI DELL'EDIFICIO E DEI MATERIALI COME INFRASTRUTTURE SOCIO-TECNICHE PER L'ECONOMIA CIRCOLARE E L'EQUITÀ

BUILDING AND MATERIAL PASSPORTS AS SOCIO-TECHNICAL INFRASTRUCTURES FOR THE CIRCULAR ECONOMY AND EQUITY

Ayşenur Babacan Demirel, Candan Çınar Çıtak

ABSTRACT

Lo studio esamina la letteratura sui passaporti dell'edificio, sui passaporti dei materiali e sui registri digitali dell'edificio attraverso le lenti dell'economia circolare e dell'equità sociale. Nell'ambito di una revisione sistematica basata sul protocollo PRISMA, 57 articoli selezionati dalle banche dati Scopus e Web of Science sono stati analizzati mediante mappatura bibliometrica e codifica tematica. I risultati indicano che la letteratura si concentra prevalentemente sull'architettura dei dati, sull'integrazione tecnologica, sulla governance e sui contesti di implementazione, mentre le dimensioni dell'equità, dell'edilizia sociale e dell'inclusione risultano meno rappresentate. Più che limitarsi a ricomporre lo stato dell'arte, lo studio reinterpreta i passaporti dell'edificio, i passaporti dei materiali e i registri digitali dell'edificio come infrastrutture socio-tecniche e ne legge il campo condiviso all'intersezione tra circolarità ed equità.

This study examines the literature on building passports, material passports, and digital building logbooks through the lenses of the circular economy and social equity. Within the scope of a PRISMA-based systematic review, 57 articles selected from the Scopus and Web of Science databases were analysed through bibliometric mapping and thematic coding. The findings indicate that the literature is primarily focused on data architecture, technological integration, governance, and implementation contexts, while the dimensions of equity, social housing, and inclusion are less well represented. Rather than merely compiling the literature, the study reinterprets building passports, material passports, and digital building logbooks as socio-technical infrastructures and reads their shared field at the intersection of circularity and equity.

KEYWORDS

passaporti dell'edificio, passaporti dei materiali, registri digitali dell'edificio, equità sociale, economia circolare

building passports, material passports, digital building logbooks, social equity, circular economy



Ayşenur Babacan Demirel, Architect, is a Research Assistant at the Fatih Sultan Mehmet Vakif University (Turkey) and PhD Candidate at the Department of Architecture, Yıldız Technical University (Turkey). Her research focuses on the circular economy, housing, and the built environment. E-mail: ababacan@fsm.edu.tr

Candan Çınar Çıtak, Architect, is an Associate Professor at the Department of Architecture, Yıldız Technical University (Turkey). Her research focuses on housing anthropology, as well as theory and methodology in housing studies. E-mail: candancinar@hotmail.com

I dibattiti su circolarità, digitalizzazione e giustizia sociale nell'ambiente costruito tendono sempre più a intrecciarsi: mentre la tracciabilità dei cicli di vita degli edifici e dei materiali assume un ruolo crescente rispetto all'efficienza delle risorse, al riuso e agli obiettivi di riduzione delle emissioni di carbonio, tali processi di trasformazione possono produrre effetti differenti sui diversi attori in termini di costi, accesso, proprietà dei dati e capacità istituzionale. In questo contesto i passaporti dell'edificio, i passaporti dei materiali e i registri digitali dell'edificio non dovrebbero essere considerati semplici strumenti tecnici ma infrastrutture capaci di orientare la trasformazione ambientale e sociale dell'ambiente costruito.

Il settore delle costruzioni, in quanto uno dei maggiori consumatori di risorse a scala globale, occupa una posizione centrale nelle crisi ambientali, rendendo sempre più necessaria la transizione dai modelli produttivi tradizionali all'economia circolare (Keles, Cruz Rios and Hoque, 2025; Gasue et alii, 2026). Tale trasformazione è tuttavia troppo multidimensionale per essere ricondotta esclusivamente agli obiettivi ambientali, alla riduzione delle emissioni o all'efficienza delle risorse: il dibattito scientifico più recente richiama infatti l'attenzione sulla dimensione spesso trascurata del ciclo di vita sociale e sottolinea come questioni quali l'equità e la giustizia spaziale debbano essere integrate nelle politiche urbane, superando approcci orientati unicamente al carbonio (Palumbo et alii, 2025; Ricci, Poli and Marino, 2025).

Gli interventi di trasformazione / riqualificazione urbana e di nuova costruzione possono generare effetti differenti che incidono su diversi aspetti della società, dalla qualità dell'abitare alla distribuzione dei costi e all'accesso a spazi di qualità (Nadais et alii, 2026). In una fase in cui la crisi abitativa e le vulnerabilità urbane risultano sempre più evidenti le strategie circolari non possono essere considerate separatamente dagli obiettivi di accessibilità economica e inclusione sociale, per progettare ambienti di vita inclusivi e sostenere il benessere urbano (Mangiatordi, 2025; Battaino, Fossati and Marconi, 2025). Per questa ragione la trasformazione sostenibile dell'ambiente costruito non va intesa soltanto come questione ecologica ma come un tema socio-economico complesso che riguarda la distribuzione equa di risorse e di opportunità.

L'attuazione di strategie circolari e di obiettivi urbani inclusivi dipende dal monitoraggio continuo dei dati relativi a materiali, prestazioni e manutenzione lungo i cicli di vita estesi degli edifici (Gasue et alii, 2026; van Capelleveen et alii, 2023), tuttavia la struttura frammentata della filiera delle costruzioni produce perdite di informazioni lungo il ciclo di vita in modo asimmetrico tra gli attori del processo edilizio (Malinovec Pucek et alii, 2023; Alonso et alii, 2023).

In risposta a tale criticità strutturale strumenti quali i passaporti dell'edificio, i passaporti dei materiali e i registri digitali dell'edificio stanno acquisendo crescente visibilità (Buchholz and Lützkendorf, 2023). La digitalizzazione costruita attorno a questi strumenti non riguarda soltanto la produzione di documenti o inventari statici ma l'istituzione di un'infrastruttura dati multilivello, sostenuta da tecnologie quali BIM e gemelli digitali (Rigillo, Galluccio and Paragliola, 2023; Çetin et alii, 2026): attraverso l'interoperabilità tra sistemi e la costruzione di ecosistemi informativi dinamici tali strumenti possono offrire dispositivi di supporto alle decisioni per il riuso dei componenti e sostenere processi di governance di più lungo periodo lungo l'intero ciclo di vita (Paganin et alii, 2024). In tal senso i sistemi informativi digitali possiedono il potenziale per rendere i processi edilizi più trasparenti, tracciabili e gestibili, rafforzando la capacità decisionale fondata sui dati (D'Amore, 2025; Osello et alii, 2024).

L'analisi della letteratura mostra che gli studi dedicati ai passaporti dell'edificio e ai sistemi informativi digitali sono in larga misura orientati a dimensioni tecniche, quali l'architettura dei dati, le ontologie e l'integrazione tecnologica; al contrario gli studi che affrontano i temi dell'edilizia sociale, della giustizia abitativa e delle disuguaglianze urbane si sono sviluppati prevalentemente in modo separato rispetto al dibattito sulle infrastrutture tecniche e digitali (Veliz Reyes et alii, 2025; Çetin, Gruis and Straub, 2022). Ne deriva che risultano ancora limitati gli studi capaci di valutare in modo integrato gli effetti degli approcci circolari e degli ecosistemi avanzati di dati su contesti caratterizzati da differenti livelli di capacità istituzionale e su gruppi sociali svantaggiati. A partire da questa lacuna l'articolo propone una sintesi sistematica che legge congiuntamente la letteratura sui passaporti dell'edificio, sui passaporti dei materiali e sui registri digitali dell'edificio attraverso le lenti dell'economia circolare e dell'equità sociale.

Il valore analitico di considerare congiuntamente questi strumenti risiede nel fatto che, pur differendo per scala e accento, essi rendono visibile un campo socio-tecnico condiviso, strutturato da dati di ciclo di vita, tracciabilità, interoperabilità, governance e supporto alle decisioni alle scale del materiale, del prodotto e dell'edificio. Lo studio non si limita quindi a passare in rassegna la letteratura su tali temi ma propone una reinterpretazione socio-tecnica e distributiva di questioni finora affrontate soprattutto da una prospettiva tecnica e informativa. Tale posizionamento concettuale è sintetizzato nella Figura 1 che colloca i passaporti dell'edificio, i passaporti dei materiali e i registri digitali dell'edificio in un campo socio-tecnico condiviso tra economia circolare ed equità sociale.

In questo quadro l'equità non è assunta come aggiunta normativa esterna, ma come lente analitica che consente di riorientare l'interpretazione del campo; più precisamente lo studio considera l'equità in tre dimensioni interrelate: l'equità distributiva, relativa a costi, benefici e accesso all'informazione; l'equità procedurale, relativa a governance, partecipazione e diritti sui dati; l'equità infrastrutturale o capacitiva, relativa alla capacità istituzionale, all'alfabetizzazione digitale e ai contesti di implementazione fragili. La Figura 2 traduce queste tre dimensioni in una matrice analitica, mettendo in relazione equità distributiva, procedurale e infrastrutturale / capacitiva con costi, accesso ai dati, governance, capacità istituzionale e alfabetizzazione digitale nei sistemi abilitati dai passaporti.

A partire da una revisione sistematica della letteratura su 57 articoli lo studio esamina come questi strumenti si intersechino con questioni quali proprietà dei dati, governance istituzionale, divario digitale e diversa capacità istituzionale nell'implementazione. In questa prospettiva l'articolo contribuisce alla valutazione di tali sistemi non come semplici archivi operativi di dati ma come infrastrutture socio-tecniche, alla luce della rilevanza congiunta degli SDG 9 e 10. L'articolo presenta dapprima il posizionamento teorico e il quadro metodologico, espone quindi i risultati bibliometrici e tematici e discute infine tali risultati attraverso le dimensioni dell'implementazione, della governance e dell'equità lungo l'asse SDG 9-10.

Posizionamento teorico: dagli strumenti tecnici all'infrastruttura socio-tecnica | Nell'ambiente costruito l'economia circolare si configura come approccio orientato al ciclo di vita, che copre il processo dalla progettazione degli edifici alla fine della loro vita utile (Gasue et alii, 2026). L'obiettivo principale di tale approccio consiste nel massimizzare il riuso e il recupero dei componenti edilizi, assicurando al contempo un flusso informativo continuo lungo l'intero processo (van Capelleveen et alii, 2023); per gestire senza perdite questo flusso informativo entro filiere complesse l'integrazione delle strategie circolari con le tecnologie digitali è divenuta una necessità critica (Keles, Cruz Rios and Hoque, 2025; Çetin et alii, 2026).

I registri digitali dell'edificio (DBL), i passaporti dell'edificio (BP) e i passaporti dei materiali (MP), sviluppati per affrontare l'asimmetria informativa nel settore, si fondano su differenze di scala tra edificio, prodotto e materiale (Markou, Sinnott and Thomas, 2025). Sebbene in letteratura si riscontrino una chiara sovrapposizione concettuale e una certa ambiguità terminologica tra questi strumenti le loro finalità risultano ampiamente condivise (Nadais et alii, 2026). Pertanto tali strumenti digitali non dovrebbero essere considerati archivi di dati isolati e indipendenti ma ecosistemi informativi gerarchici e interrelati, estesi dalla scala del prodotto a quella dell'edificio (Gómez-Gil, Espinosa-Fernández and López-Mesa, 2022a; Buchholz and Lützkendorf, 2023). La Figura 3 chiarisce questa relazione multiscalare, capace di integrare e aggiornare le informazioni lungo il ciclo di vita dell'edificio, collocando i passaporti dei materiali tra scala del materiale e scala del componente / prodotto, i passaporti dell'edificio alla scala edilizia e i registri digitali dell'edificio come livello trasversale di registrazione.

Nei sistemi abitativi la nozione di equità è direttamente connessa al modo in cui i costi del ciclo di vita, le responsabilità manutentive e il diritto di accesso alle informazioni strutturali sono distribuiti tra gli attori del processo edilizio (Çetin, Gruis and Straub, 2022; Nadais et alii, 2026). Le disuguaglianze nell'accesso alle infrastrutture digitali e l'acuirsi del divario digitale possono limitare la partecipazione dei gruppi svantaggiati a processi decisionali qualificati (Gasue et alii, 2026; Wandiga, 2020), per questa ragione gli strumenti tecnici progettati per garantire trasparenza nel settore producono non solo esiti operativi ma anche specifici impatti sociali che incidono sulla distribuzione di risorse e benefici (Çetin et alii, 2023; Barbosa and Almeida, 2025).

La struttura complessa dei sistemi di passaporto richiede di leggere tali strumenti come infrastrutture socio-tecniche piuttosto che come archivi neutri di dati o semplici software tecnici (Veliz Reyes et alii, 2025; Çetin et alii, 2026); il buon funzionamento del sistema dipende dalla capacità istituzionale delle organizzazioni, dal coordinamento tra gli stakeholder, dall'equa distribuzione dei diritti di proprietà sui dati e da condizioni trasparenti di governance (Lu et alii, 2023; van Capelleveen et alii, 2023; Mêda et alii, 2024a). Questa logica di 'sistema dei sistemi' è illustrata nella Figura 4, in cui l'infrastruttura socio-tecnica abilitata dai passaporti è rappre-

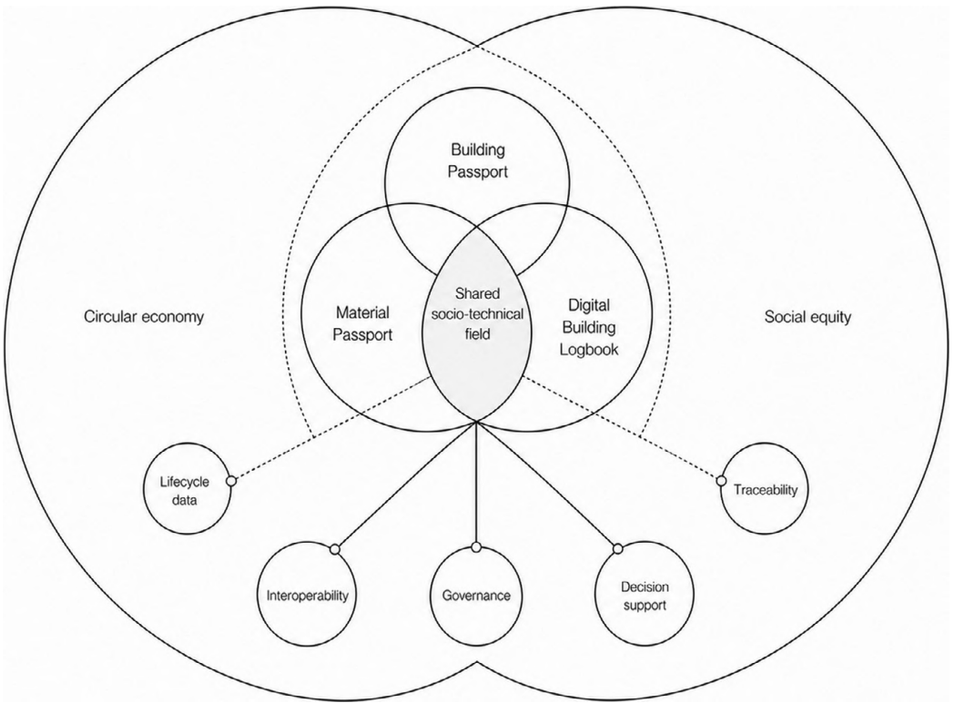


Fig. 1 | Conceptual positioning of building passports, material passports, and digital building logbooks as a shared socio-technical field between circular economy and social equity (credit: the Authors, 2026).

sentata come un ecosistema di implementazione che connette BIM, gemelli digitali, standard interoperabili, gestione dei dati, governance, attori, politiche / regolamenti e tecnologie emergenti quali blockchain / Web3. In altri termini, poiché l'hardware e la capacità tecnica offerti dalla sola digitalizzazione non sono sufficienti, emerge la necessità di costruire un quadro socio-economico e amministrativo capace di rendere effettivo il potenziale di questi strumenti (Çetin et alii, 2026; Aklashie et alii, 2026).

Metodologia | Lo studio adotta una revisione sistematica della letteratura, integrata da mappatura bibliometrica e codifica tematica. Il disegno metodologico è stato costruito per rendere verificabile l'intero percorso di selezione, analisi e interpretazione del corpus. La revisione non è finalizzata a misurare l'efficacia degli interventi né a produrre una gerarchia quantitativa delle evidenze, ma a ricostruire orientamenti di ricerca, quadri concettuali, prossimità bibliografiche e temi ricorrenti relativi ai passaporti dell'edificio, ai passaporti dei materiali e ai registri digitali dell'edificio, letti attraverso le lenti dell'economia circolare e dell'equità sociale.

Il protocollo di revisione è stato articolato in quattro fasi sequenziali, coerenti con la logica PRISMA: identificazione, screening, eleggibilità e inclusione. La ricerca bibliografica è stata condotta il 10 marzo 2026 nelle banche dati Scopus e Web of Science, utilizzando la stessa stringa in entrambe le piattaforme: 'building passport' OR 'material passport' OR 'digital building logbook' OR 'building logbook'. La stringa è stata definita per intercettare le principali denominazioni degli strumenti di documentazione e di tracciabilità discussi nella letteratura sull'ambiente costruito.

L'interrogazione delle banche dati ha restituito 133 record in Scopus e 72 record in Web of Science, per un totale iniziale di 205 record. I risultati sono stati esportati in formato CSV, unificati in Microsoft Excel e controllati manualmente per individuare le duplicazioni. La rimozione di 65 duplicati ha prodotto un dataset di 140 record unici, successivamente sottoposti a screening su titolo e abstract.

I criteri di inclusione hanno considerato: studi pubblicati tra il 2015 e il 2025; testi in lingua inglese; contributi classificati come 'article' o 'review article'; pertinenza diretta rispetto a passaporti dell'edificio, passaporti dei materiali, registri digitali dell'edificio, dati di ciclo di vita, tracciabilità, interoperabilità, governance, economia circolare, dimensione infrastrutturale dell'innovazione o implicazioni distributive. Sono stati esclusi i record in cui i termini di ricerca comparivano in modo marginale o in ambiti non pertinenti all'architettura, alle costruzioni e all'ambiente costruito. Sono state inoltre escluse le aree disciplinari non coerenti con il perimetro della revisione: Materials Science (8), Mathematics (5), Physics and Astronomy (4), Chemical Engineering (4) ed Earth and Planetary Sciences (2).

Nella fase di screening sono stati esclusi 75 record sulla base del titolo e dell'abstract. I 65 studi rimasti sono stati considerati eleggibili per la valutazione a testo integrale; di questi, 2 non sono stati recuperati per indisponibilità del testo integrale: sono stati quindi valutati 63 testi completi. In questa fase sei studi sono stati esclusi perché non sufficientemente coerenti con il perimetro della revisione, in quanto debolmente allineati ai temi dell'economia circolare, dei dati di ciclo di vita, della tracciabilità o del contesto architettonico, costruttivo e dell'ambiente costruito: il corpus finale è pertanto composto da 57 studi. L'intero processo di selezione è sintetizzato nel diagramma PRISMA (Fig. 5). Lo screening è stato condotto congiuntamente dai due autori. I casi di incertezza sono stati discussi fino al raggiungimento di un consenso condiviso, così da ridurre la discrezionalità individuale nella selezione del corpus. Per ciascun record sono stati verificati: coerenza con la domanda di ricerca, pertinenza rispetto alla scala materiale / prodotto / edificio, presenza di contenuti relativi a dati di ciclo di vita o tracciabilità, rilevanza rispetto a governance, implementazione o implicazioni socio-distributive.

Gli studi inclusi sono stati quindi valutati comparativamente in relazione a quattro aspetti: pertinenza rispetto al focus della ricerca, chiarezza concettuale, trasparenza metodologica e contributo alla sintesi tematica. Non è stata applicata una valutazione quantitativa della qualità né sono stati attribuiti punteggi ai singoli articoli. Tale scelta deriva dalla natura esplorativa e interpretativa della revisione, orientata a mappare configurazioni e relazioni nel campo, più che a valutare l'efficacia di specifici interventi. Questa impostazione costituisce anche un limite metodologico: i risultati vanno letti come sintesi strutturata del campo e non come classificazione graduata della robustezza delle evidenze.

La componente bibliometrica è stata utilizzata a supporto dell'analisi descrittiva del corpus e per rendere visibili le relazioni tra termini, documenti e cluster di ricerca. Le mappe di co-occorrenza delle parole chiave e di accoppiamento bibliografico sono state generate con VOSviewer 1.6.20; la visualizzazione è stata costruita sul dataset Scopus, utilizzando la stessa logica di ricerca impiegata nella revisione sistematica. Questa scelta ha avuto una funzione tecnica, legata alla maggiore numerosità dei record restituiti da Scopus e alla migliore compatibilità dei metadati con VOSviewer; non ha comportato una restrizione del corpus finale che deriva invece dall'integrazione tra Scopus e Web of Science.

La mappa di co-occorrenza è stata prodotta utilizzando le parole chiave degli autori, con una soglia minima di occorrenza pari a 2; la mappa di accoppiamento bibliografico è stata generata a livello di documento, per individuare la prossimità tra studi sulla base delle reference condivise: in entrambi i casi sono state mantenute le impostazioni predefinite di VOSviewer. Non è stato utilizzato un file thesaurus; prima dell'interpretazione le parole chiave sono state tuttavia controllate manualmente per eliminare sovrapposizioni evidenti e varianti

terminologiche non sostanziali. Le mappe sono state considerate strumenti descrittivi e di orientamento analitico, non risultati autosufficienti.

La codifica tematica è stata sviluppata in due passaggi: nel primo passaggio ciascun articolo è stato esaminato rispetto al focus principale, alla scala di analisi, all'enfasi tecnica, alla dimensione di governance, al contesto di implementazione e al trattamento delle questioni connesse all'equità; nel secondo passaggio i pattern ricorrenti sono stati aggregati in categorie tematiche più ampie. Questo processo ha condotto all'individuazione di sei cluster tematici, utilizzati come struttura analitica dei risultati e riportati nella Tabella 2; ogni articolo è stato assegnato al cluster che ne esprimeva il contributo dominante e quando un testo presentava più dimensioni rilevanti l'assegnazione è stata effettuata sulla base del tema maggiormente sviluppato nel contributo.

Per rendere esplicito il livello interpretativo dell'analisi lo studio distingue tre piani: risultati direttamente osservabili nel corpus e nelle visualizzazioni bibliometriche; sintesi autoriali derivate da configurazioni ricorrenti; inferenze interpretative sviluppate a partire dalla struttura complessiva della letteratura esaminata. In questo quadro l'equità non è stata codificata semplicemente come termine esplicitamente presente negli articoli, ma come una lente analitica articolata in tre dimensioni: equità distributiva, equità procedurale e equità infrastrutturale.

Risultati | Gli studi di revisione costituiscono il gruppo più ampio, con 20 articoli, seguiti da 15 studi metodologici, 14 empirici e 8 concettuali. Tale distribuzione mostra che è stata sviluppata una base di ricerca non soltanto teorica ma anche metodologica e orientata alla pratica. Come indicato nella Tabella 1 questa distribuzione è utilizzata per profilare il corpus esaminato, non per inferire una dominanza tematica nel campo. I risultati bibliometrici derivati dalla mappatura VOSviewer basata su Scopus sono presentati mediante visualizzazioni di co-occorrenza delle parole chiave e di coupling bibliografico, utilizzate per valutare cluster concettuali e prossimità bibliografiche tra gli studi. La rete di co-occorrenza delle parole chiave presentata nella Figura 6 mostra che il termine 'circular economy' occupa una posizione centrale nella letteratura. La concentrazione di termini quali sustainability', 'built environment', 'life cycle assessment', 'BIM', 'digital twin', 'digitalisation' e 'blockchain' attorno a questo concetto indica che la letteratura si organizza intorno a sostenibilità, valutazione del ciclo di vita e infrastruttura dati digitale. La mappa rivela inoltre che gli strumenti orientati ai passaporti non costituiscono un blocco omogeneo. Mentre i concetti di 'building passport', 'building logbook' e 'digital building logbook' sono più strettamente associati a 'digitalisation', 'building information modelling', 'energy renovation', 'energy efficiency' ed 'energy performance certificate' il concetto di 'material passports' si colloca più chiaramente in relazione a BIM, blockchain, construction waste management, lifecycle e ai dibattiti sulla circolarità orientata ai materiali: ciò suggerisce che la letteratura sui passaporti dell'edificio e sui registri digitali si è sviluppata soprattutto lungo l'asse prestazione edilizia, riqualificazione e gestione digitale dell'informazione, mentre la letteratura sui passaporti dei materiali si è sviluppata lungo l'asse tracciabilità dei materiali, architettura dei dati e circolarità delle risorse.

I casi austriaci sui passaporti dei materiali chiariscono ulteriormente come questo filone orientato al materiale operi sia nel confronto dei materiali in fase di progetto sia nella valutazione di urban mining a fine vita, collegando documentazione basata su BIM, banche dati sui materiali e sull'ambiente e decisioni di riuso o riciclo (Fig. 7). La minore visibilità dei concetti relativi alla giustizia sociale e all'equità nella rete mostra inoltre la prevalenza, nella letteratura, di fuochi tecnici, ambientali e digitali. Tali osservazioni costituiscono risultati descrittivi del dataset mappato; le loro implicazioni socio-tecniche più ampie sono discusse nelle sezioni successive.

L'analisi di accoppiamento della bibliografia condotta sul dataset Scopus mostra come la prossimità tra gli studi sia strutturata sulla base delle reference condivise (Fig. 8). La mappa evidenzia che la letteratura, anziché costituire una struttura omogenea, è composta da gruppi di studi aggregati attorno a un nucleo comune, pur sviluppando sotto-orientamenti differenti: essa indica una prossimità bibliografica fondata su reference condivise, non un'influenza intellettuale diretta o una collaborazione tra autori. Al centro della rete Benachio (2020), Atta, Bakhoum e Marzouk (2021), Çetin, Gruis e Straub (2022) e Talla e McIlwaine (2024) emergono come i nodi più visibili di convergenza bibliografica nel campo. Al contrario il cluster costruito attorno a Sesana and Salvalai (2018), Gómez-Gil et alii (2023), Alonso et alii (2023) e Malinovec Pucek et alii (2023) rimanda a un orientamento bibliografico più specifico della letteratura. Tale analisi mostra che la letteratura sui passaporti dell'edificio, sui passaporti dei materiali e sui registri digitali dell'edificio non segue un'unica traiettoria lineare di sviluppo ma comprende linee di ricerca che condividono cluster di reference comuni, differenziandosi per focus analitici.

La codifica tematica ha mostrato che i 57 articoli si concentrano su sei cluster principali. Come riportato nella Tabella 2 la distribuzione tematica costituisce la principale struttura interpretativa su cui si è basata l'organizzazione del corpus esaminato. Tale struttura rivela che la letteratura si estende dall'architettura dei dati all'integrazione tecnologica, alla governance, ai contesti di implementazione e, in misura più limitata, alle dimensioni dell'equità e dell'inclusione. Nel loro insieme i risultati indicano che il campo resta prevalentemente orientato alla progettazione tecnica dei sistemi, all'interoperabilità, alla governance e ai problemi di implementazione (Veliz Reyes et alii, 2025; Çetin et alii, 2026; Luscuere, 2017). Per contro il tema di 'equity, social housing and inclusion' risulta meno ampiamente rappresentato rispetto ai temi più tecnici e amministrativi (Gasue et alii, 2026; Wandiga, 2020).

Tuttavia, sebbene gli studi dedicati all'inclusione sociale e agli effetti distributivi della digitalizzazione siano meno numerosi, essi costituiscono una linea di ricerca importante ed emergente, capace di sostenere un'implementazione più equa degli strumenti di passaporto e registro nel settore (Çetin et alii, 2023; Çetin, Gruis and Straub, 2022). Ciò non riduce la rilevanza analitica degli studi orientati all'equità ma indica piuttosto che essi rappresentano un filone ancora minoritario, seppure significativo, nella letteratura attuale.

Traduzione operativa dell'equità nei sistemi abilitati dai passaporti | La letteratura esaminata suggerisce che l'integrazione tra i registri digitali dell'edificio e i sistemi di passaporto sia rilevante non solo come questione tecnica, ma anche per il modo in cui trasparenza informativa, accesso e responsabilità vengono organizzati in contesti socialmente diseguali (Çetin, Gruis and Straub, 2022; Barbosa and Almeida, 2025). Tali strumenti offrono diversi meccanismi operativi che sostengono i diritti abitativi dei gruppi svantaggiati e la distribuzione equa delle risorse, rendendo possibili le strategie di costruzione circolare sul piano socio-economico. La traduzione operativa dell'equità agisce innanzitutto attraverso la produzione di trasparenza sui costi di ciclo di vita degli edifici, consentendo ad attori quali i gestori dell'edilizia sociale di ottimizzare le decisioni di manutenzione e riqualificazione lungo l'asse dell'accessibilità economica (Gómez-Gil, Espinosa-Fernández and López-Mesa, 2022a; Çetin, Gruis and Straub, 2022; Gómez-Gil et alii, 2024a; Gasue et alii, 2026; Nadais et alii, 2026). Tuttavia, affinché tale trasparenza sia equa, sono necessarie nuove collaborazioni istituzionali, capaci di garantire che le responsabilità di aggior-

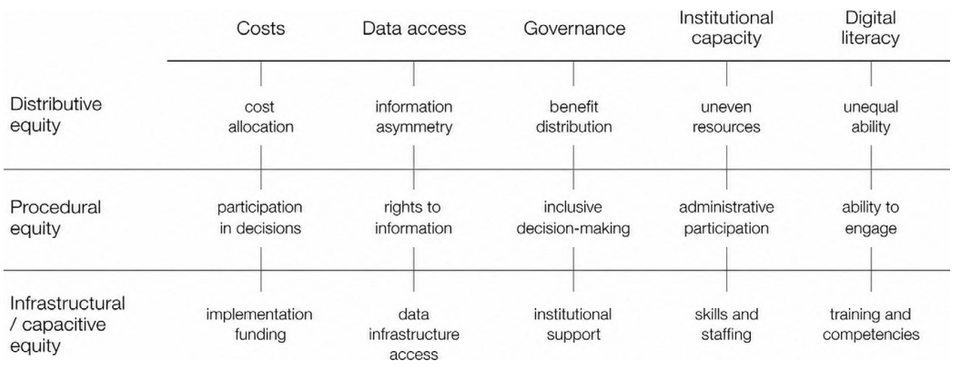


Fig. 2 | Analytical matrix of equity dimensions across costs, data access, governance, institutional capacity, and digital literacy in passport-enabled systems (credit: the Authors, 2026).

namento dei dati e gli oneri manutentivi all'interno del sistema siano distribuiti in modo bilanciato tra gli stakeholder della filiera (Honic et alii, 2019; Veliz Reyes et alii, 2025; Espinoza-Zambrano, Marmolejo-Duarte and García-Hooghuis, 2023; van Capelleveen et alii, 2023).

Al tempo stesso la governance dei dati raccolti secondo i principi FAIR e la definizione di una gestione inclusiva e decentralizzata dei diritti digitali, finalizzata a superare l'asimmetria informativa, costituiscono un'infrastruttura per l'accesso democratico all'informazione (Abhishek et alii, 2026; Lu et alii, 2023; Senarathne, Weerasinghe and Zhang, 2025; Buchholz and Lützkendorf, 2023; Alonso et alii, 2023; Aklashie et alii, 2026). Infine digitalizzando i mercati dei materiali secondari e le reti locali della riparazione questi sistemi sostengono la costruzione di catene locali del valore circolare in grado di generare benefici sociali diretti, soprattutto nei contesti in via di sviluppo (Gómez-Gil et alii, 2024b; Çetin et alii, 2023; Mao and Cao, 2025; Mankata et alii, 2025). Il caso olandese dell'edilizia sociale mostra inoltre come gli strumenti digitali e legati ai passaporti possano sostenere decisioni di manutenzione, riqualificazione e riuso in contesti di abitare accessibile, rendendo al contempo evidente l'importanza della capacità organizzativa nell'implementazione (Fig. 9).

Dal concetto all'implementazione: un quadro sistemico | L'adozione pratica dei sistemi di passaporto e di registro digitale richiede che tali strumenti siano considerati non come semplici software tecnologici ma come infrastrutture socio-tecniche nelle quali dimensioni tecnologiche, processuali e attoriali operano congiuntamente (Veliz Reyes et alii, 2025; Çetin et alii, 2026). Diversi studi mostrano che l'integrazione efficace dipende non solo dalla capacità tecnica ma anche dal coordinamento istituzionale, dalla chiara definizione delle responsabilità e da modalità operative orientate agli utenti (Çetin et alii, 2026; Mêda et alii, 2024a). Per questa ragione standard comuni per i dati, fiducia tra gli stakeholder e assetti di governance praticabili svolgono un ruolo decisivo nel funzionamento del sistema (Veliz Reyes et alii, 2025; Çetin et alii, 2026; Mêda et alii, 2024a). La Figura 10 rende più concrete queste condizioni di implementazione mappando gli attori chiave nei sistemi abilitati dai passaporti rispetto a diritti di accesso, obblighi di aggiornamento, benefici potenziali e rischi, entro un più ampio quadro di governance e proprietà dei dati.

La traduzione operativa dei processi circolari attraverso i sistemi di passaporto è direttamente connessa non solo alla sostenibilità ambientale ma anche agli obiettivi di equità sociale (Lavikka et alii, 2025; Nadais et alii, 2026). Rendendo più visibili i dati sul Patrimonio edilizio, sui costi di ciclo di vita e sulla qualità dei materiali, i sistemi di passaporto riducono le asimmetrie di informazioni (Çetin, Gruis and Straub, 2022; Lavikka et alii, 2025), con possibili ricadute positive sulla capacità decisionale dei gruppi svantaggiati in relazione all'abitare. In questo contesto l'equità dovrebbe essere considerata non solo in termini di prestazione tecnica del sistema ma anche rispetto al modo in cui costi, responsabilità e diritti di accesso sono organizzati (van Capelleveen et alii, 2023; Nadais et alii, 2026).

Sintetizzando i risultati della letteratura gli autori propongono un framework olistico basato sull'approccio del 'system of systems' per discutere l'implementazione efficace e scalabile dei sistemi di passaporto (Çetin et alii, 2026). L'architettura proposta si fonda sull'integrazione del BIM per la progettazione dei dati, dei gemelli digitali per il monitoraggio delle condizioni operative e delle tecnologie blockchain per la verifica trasparente dei dati (Abhishek et alii, 2026; Senarathne et alii, 2025; Aklashie et alii, 2026).

All'interno di questo quadro gli indicatori minimi utili a valutare i sistemi basati sui passaporti in termini di equità e capacità di implementazione possono essere sintetizzati nella trasparenza dei costi di ciclo di vita, nella chiarezza delle responsabilità di aggiornamento dei dati, nella definizione dei diritti di accesso alle informazioni sull'edificio, nella visibilità dei dati a supporto delle decisioni di riuso e manutenzione e nel livello di connessione stabilito con le catene locali del valore circolare. Il funzionamento di tale modello dipende tuttavia dalla garanzia di un'interoperabilità aperta tra sistemi, dal sostegno alla standardizzazione dei dati e dalla costruzione di quadri di governance e regolativi appropriati (Çetin et alii, 2026). I casi comparativi di Aragona (Spagna) e Lombardia (Italia) mostrano inoltre che l'implementazione dei DBL dipende non solo dall'esistenza di fonti dati relative agli edifici, ma anche dalla loro apertura, interoperabilità, capacità di integrazione e struttura regionale di governance dei dati (Tab. 3).

Governance, rischi e compromessi | L'implementazione reale del framework socio-tecnico proposto, pur garantendo la tracciabilità tra gli stakeholder, richiede di considerare con attenzione compromessi complessi, determinati da confini istituzionali, rischi di governance ed effetti diseguali (Veliz Reyes et alii, 2025; Çetin, Gruis and Straub, 2022; Çetin et alii, 2026; Barbosa and Almeida, 2025). Inoltre, in ragione della sensibilità dei dati edilizi, i principi di privacy e di protezione dei dati, le responsabilità di data stewardship e le asimmetrie di potere decisionale e operativo tra gli attori costituiscono questioni fondamentali da includere nel quadro di governance di tali sistemi. In caso contrario anziché produrre soluzioni i sistemi di passaporto possono comportare un rischio di 'soluzionismo tecnologico', riproducendo attraverso strumenti digitali disuguaglianze già esistenti. Più precisamente la letteratura evidenzia tre tensioni ricorrenti: tra interoperabilità e costi di gestione, tra trasparenza e riservatezza e tra innovazione digitale e diversa capacità istituzionale; tali tensioni sono sintetizzate nella Figura 11 come tre trade-off di governance da bilanciare nell'implementazione dei sistemi abilitati dai passaporti.

I principali limiti che incidono sul funzionamento di questo quadro sono la resistenza dei professionisti del settore, la mancanza di formazione e la limitata capacità organizzativa, fattori che rendono complesso il coordinamento tra stakeholder (Markou, Sinnott and Thomas, 2025; Honic et alii, 2019; Gasue et alii, 2026). Inoltre la tensione tra riservatezza commerciale e trasparenza nelle filiere complesse produce rilevanti rischi di governance relativi alla proprietà dei dati e ai diritti di accesso, mentre le tecnologie decentralizzate proposte come meccanismi di fiducia limitano la propria applicabilità pratica a causa dei costi elevati e delle incertezze giuridiche (Lu et alii, 2023; Senarathne et alii, 2025; Aftab and Agliata, 2026; van Capelleveen

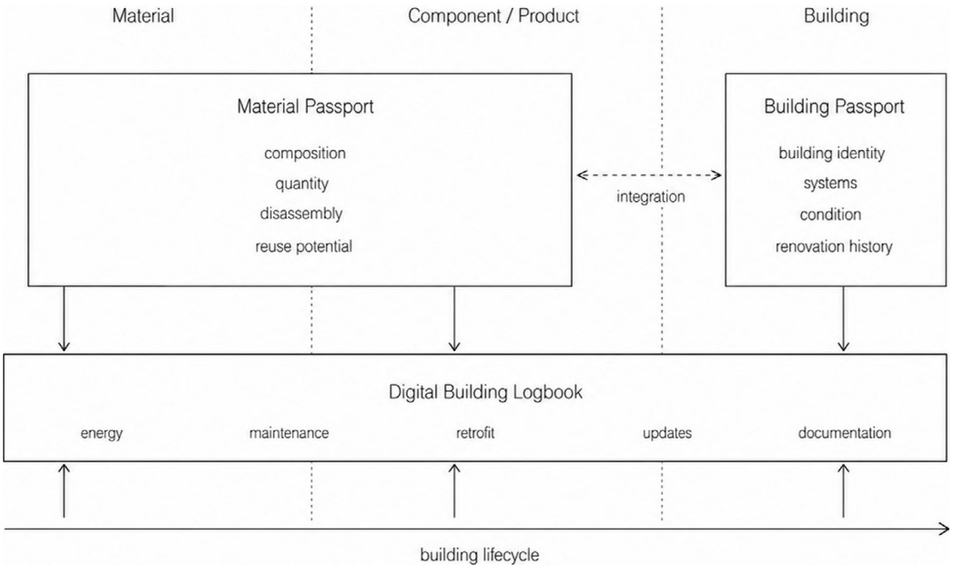


Fig. 3 | Multiscale positioning of material passports, building passports and digital building logbooks across material, component / product, and building scales (credit: the Authors, 2026).

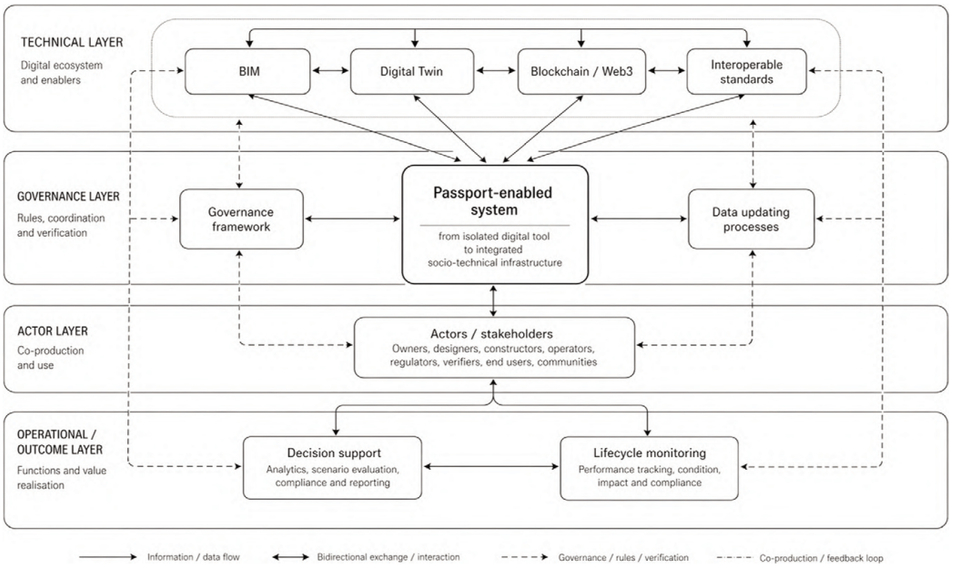


Fig. 4 | System-of-systems framework for passport-enabled socio-technical infrastructure (credit: the Authors, 2026).

et alii, 2023; Alonso et alii, 2023; Aklashie et alii, 2026). Tutte queste barriere tecniche e amministrative indirizzano l'adozione di sistemi informativi avanzati verso progetti ad alto budget, piuttosto che verso interventi di edilizia sociale con risorse limitate o verso Paesi in via di sviluppo, generando così un profondo divario digitale e un problema di diversa capacità degli attori coinvolti, per cui gli strumenti non possono essere implementati nella stessa misura per tutti (Markou, Sinnott and Thomas, 2025; Çetin, Gruis and Straub, 2022; Gasue et alii, 2026; Lavikka et alii, 2025).

Implicazioni per gli SDG: sinergie, trade-off e condizioni di governance | La rilevanza dei sistemi abilitati dai passaporti rispetto agli SDG non emerge come livello di policy esterno aggiunto alla revisione, ma deriva dall'analisi del modo in cui tali sistemi riorganizzano informazioni, responsabilità e capacità nell'ambiente costruito. I sistemi abilitati dai passaporti assumono un significato critico per gli SDG 9 e 10 in quanto dispositivi strategici capaci di orientare la trasformazione socio-economica dell'ambiente costruito (Gasue et alii, 2026; Çetin et alii, 2026). Il modo in cui questi strumenti ridefiniscono asimmetria delle informazioni, trasparenza e questioni di giustizia nel settore si colloca all'intersezione tra questi due obiettivi globali (Nadais et alii, 2026).

Nel quadro dell'SDG 9 i sistemi di passaporto offrono un'infrastruttura digitale dinamica, capace di rispondere alle esigenze di interoperabilità aumentando la capacità innovativa del settore (Çetin et alii, 2026; Aklashie et alii, 2026). Tuttavia il potenziale trasformativo di tale integrazione tecnologica resta nella pratica limitato se non è sostenuto da una standardizzazione comune dei dati e da una solida capacità istituzionale (Çetin et alii, 2026): il funzionamento efficace degli ecosistemi digitali innovativi dipende quindi non solo dalle infrastrutture tecnologiche ma anche dalla costruzione di una base sociale e amministrativa inclusiva (Çetin et alii, 2026).

Valutata dalla prospettiva dell'SDG 10 la trasparenza prodotta dagli strumenti digitali nei costi di ciclo di vita e nell'accesso all'informazione può sostenere la capacità decisionale dei gruppi svantaggiati (Çetin et alii, 2023; Barbosa and Almeida, 2025). Tuttavia una maggiore visibilità dei costi e accesso ai dati non producono automaticamente equità sociale nel settore (Nadais et alii, 2026): la riduzione delle disuguaglianze dipende dall'equa distribuzione degli oneri manutentivi tra gli attori e dalla progettazione dei sistemi secondo un quadro operativo capace di considerare le differenze di capacità istituzionale (Çetin et alii, 2023; Barbosa and Almeida, 2025; Nadais et alii, 2026).

La trasferibilità dei sistemi di passaporto tra contesti socio-economici differenti mostra una struttura fortemente sensibile al contesto rispetto alla validità delle politiche di tali strumenti (Çetin et alii, 2026). Modelli standard che producono esiti positivi in mercati sviluppati, dotati di solide infrastrutture istituzionali, possono non generare la stessa trasparenza ed efficienza in progetti di edilizia sociale a capacità limitata o in regioni in via di sviluppo (Gasue et alii, 2026; Nadais et alii, 2026). Per questa ragione la trasferibilità universale dei quadri di politica sul digitale non è assoluta, richiede una valutazione congiunta di governance locale, confini socio-culturali e differenze di capacità istituzionale (Gasue et alii, 2026; Çetin et alii, 2026). Il caso del Ghana rende visibile questa trasferibilità condizionata, mostrando che l'implementazione dei passaporti dipende da consapevolezza professionale, dati standardizzati sui materiali, garanzia di qualità, sostegno delle politiche e integrazione (Fig. 12).

La relazione stabilita tra gli SDG 9 e 10 genera inoltre sinergie e compromessi indiretti con altri obiettivi di sviluppo sostenibile. In particolare rispetto a città e comunità sostenibili (SDG 11), consumo e produzione responsabili (SDG 12) e lotta contro il cambiamento climatico (SDG 13) i sistemi di passaporto possono offrire contributi positivi attraverso tracciabilità dei materiali, pianificazione della riqualificazione ed efficienza delle risorse. Quando le disuguaglianze nell'accesso alle infrastrutture digitali, nell'alfabetizzazione ai dati e nella capacità istituzionale non sono adeguatamente considerate, questi strumenti possono generare nuovi compromessi, escludendo alcuni gruppi dal sistema anziché sostenere l'equità.

Oltre alla rilevanza diretta dei sistemi abilitati dai passaporti per gli SDG 9, 10, 11 e 12 possono emergere effetti indiretti e compromessi anche rispetto ad altri obiettivi. Una maggiore trasparenza e un accesso più inclusivo alle informazioni sull'edificio possono sostenere indirettamente: gli SDG 1 e 10 riducendo la vulnerabilità nei contesti abitativi a basso reddito; gli SDG 3 e 11 attraverso ambienti costruiti più salubri e meglio manutenuti; l'SDG 4 mediante lo sviluppo dell'alfabetizzazione digitale e delle competenze tecniche; l'SDG 5 nei casi in cui l'accesso alle infrastrutture digitali e ai processi decisionali sia distribuito in modo diseguale; l'SDG 7 attraverso la pianificazione della riqualificazione e dell'efficienza energetica; l'SDG 8 mediante l'attivazione di lavoro circolare e mercati della riparazione; l'SDG 13 attraverso una migliore tracciabilità dei materiali e percorsi di decarbonizzazione; l'SDG 16 attraverso assetti di governance più trasparenti; l'SDG 17 attraverso interoperabilità e collaborazione intersettoriale.

Tali benefici restano tuttavia condizionati: laddove capacità istituzionale, diritti sui dati, inclusione digitale e garanzie di governance sono deboli i sistemi di passaporto possono riprodurre esclusione anziché sostenere transizioni eque. Per i ricercatori queste riflessioni pongono nuove domande su equità e capacità istituzionale; per gli esperti tecnici suggeriscono una checklist di indicatori operativi minimi; alla Pubblica Amministrazione offrono una base per definire criteri relativi agli asset pubblici, requisiti di gara e condizioni di implementazione sensibili al contesto.

Conclusioni | Lo studio ha presentato una revisione sistematica della letteratura che valuta congiuntamente passaporti dell'edificio, passaporti dei materiali e registri digitali dell'edificio attraverso le lenti dell'economia circolare e dell'equità sociale. La revisione di 57 articoli selezionati dalle banche dati Scopus e Web of Science mostra che la letteratura si è sviluppata principalmente attorno ad architettura dei dati, integrazione tecnologica, interoperabilità, governance e contesti di implementazione, mentre equità, edilizia sociale e inclusione rimangono relativamente sottorappresentate. La mappatura bibliometrica ha inoltre evidenziato che la circolarità, la sostenibilità e la digitalizzazione sono temi prevalenti in letteratura, mentre la giustizia so-

ciale e gli effetti distributivi sono stati trattati con minore frequenza. Letti congiuntamente i sistemi di passaporto rivelano un campo socio-tecnico condiviso, strutturato da dati di ciclo di vita, tracciabilità, interoperabilità, governance e supporto alle decisioni alle scale del materiale, del prodotto e dell'edificio.

I risultati mostrano che non è sufficiente trattare questi strumenti come meri archivi tecnici o contenitori neutri di dati; oltre che organizzare l'informazione i sistemi di passaporto possono rimodellare responsabilità, oneri manutentivi, potere decisionale e accesso alle opportunità della circolarità tra attori differenti. In questo senso il contributo dell'articolo non risiede soltanto nella revisione della letteratura, ma fornisce una reinterpretazione socio-tecnica e distributiva di un campo finora discusso prevalentemente su basi tecniche e informative.

L'asse dell'equità è centrale in questa reinterpretazione perché consente di leggere il campo non solo in termini di prestazione tecnica ma anche attraverso la distribuzione di costi, benefici e accesso all'informazione, la governance della partecipazione e dei diritti sui dati e le diverse capacità istituzionali e digitali attraverso cui questi sistemi diventano operativi. In tale prospettiva l'equità non è trattata come un'aggiunta normativa esterna ma come una categoria analitica capace di riorientare l'interpretazione del campo. Più specificamente la revisione suggerisce che l'equità in questo ambito possa essere compresa attraverso tre dimensioni correlate: equità distributiva, relativa a costi, benefici e accesso; equità procedurale, relativa a governance, partecipazione e diritti sui dati; ed equità infrastrutturale o capacitiva, relativa a capacità istituzionale, alfabetizzazione digitale e contesti di implementazione fragili.

Al tempo stesso la revisione chiarisce che la digitalizzazione non produce automaticamente esiti più equi; gli effetti sociali dei sistemi abilitati dai passaporti dipendono dal modo in cui vengono governate nella pratica tensioni ricorrenti tra interoperabilità e costi di gestione, tra trasparenza e riservatezza e tra innovazione digitale e diversa capacità istituzionale. In questo quadro la rilevanza dello studio per gli SDG 9 e 10 emerge direttamente dall'analisi e non come livello di policy esterno; se i sistemi di passaporto sono intesi come infrastrutture socio-tecniche che modellano accesso, responsabilità e capacità istituzionale la loro importanza per l'innovazione e le infrastrutture (SDG 9) e per la riduzione delle disuguaglianze (SDG 10) deriva direttamente dai risultati. Le connessioni più ampie con gli SDG 11, 12 e 13 emergono analogamente dalle implicazioni per abitare, riqualificazione, riuso dei materiali ed efficienza delle risorse; al contempo assetti di governance deboli, alfabetizzazione digitale diseguale e limitata preparazione delle Istituzioni possono generare compromessi che incidono su obiettivi di sostenibilità più ampi.

Sebbene il perimetro della revisione sia limitato agli articoli di rivista e agli articoli di revisione in lingua inglese indicizzati in banche dati selezionate e i documenti ufficiali nazionali e internazionali, rapporti istituzionali e riferimenti normativi non sono stati inclusi nel corpus per mantenere un ambito gestibile, la loro integrazione potrebbe approfondire ulteriormente la discussione su impatti di policy, contesti di implementazione e pubblica amministrazione. Le ricerche future dovrebbero pertanto estendere il campo attraverso evidenze empiriche più ampie, analisi comparative più trasparenti e una maggiore attenzione ai contesti fragili, quali l'edilizia sociale, condizioni a basso reddito e Paesi in via di sviluppo. Ulteriori studi sono particolarmente necessari per esaminare in quali condizioni i sistemi basati sui passaporti possano ridurre le disuguaglianze, riprodurle o generare nuove forme di esclusione.

The debates on circularity, digitalisation, and social justice in the built environment are increasingly intersecting. As the traceability of building and material life cycles gains importance in terms of resource efficiency, reuse, and low-carbon targets, these transformation processes may produce unequal effects on different actors with regard to cost, access, data ownership, and institutional capacity. In this context, building passports, material passports, and digital building logbooks should be considered not merely as technical tools but as infrastructures that shape the environmental and social transformation of the built environment. As one of the largest consumers of resources on the global scale, the construction sector stands at the centre of environmental crises, which makes the transition from traditional production models to the circular economy increasingly important (Keles, Cruz Rios and Hoque, 2025; Gasue et alii, 2026). However, this transformation is too complex and multidimensional to be reduced solely to environmental targets, emission reduction, or resource efficiency. Current debates draw attention to the often-overlooked dimension of the social life cycle and emphasise that issues such as equity and spatial justice should be integrated into urban policies by moving beyond carbon-oriented approaches (Palumbo et alii, 2025; Ricci, Poli and Marino, 2025).

Urban transformation, renovation, and new construction practices may generate unequal effects on different segments of society in terms of housing quality, the distribution of costs, and access to high-quality spaces (Nadais et alii, 2026). Under conditions in which the housing crisis and urban vulnerabilities have become more visible, circular strategies need to be addressed together with affordability and social inclusion goals in order to design inclusive living environments and support urban well-being (Mangiatordi, 2025; Battaino, Fossati and Marconi, 2025). For this reason, the sustainable transformation of the built environment should be considered not only as an ecological issue, but also as a holistic socio-economic matter involving the fair distribution of resources and opportunities.

The implementation of circular strategies and inclusive urban goals depends on the continuous monitoring of material, performance, and maintenance data throughout the long life cycles of buildings (Gasue et alii, 2026; van Capelleveen et alii, 2023). However, the fragmented supply chain structure of the construction sector leads to data losses across the life cycle and to information asymmetries among actors (Malinovec Pucek et alii, 2023; Alonso et alii, 2023).

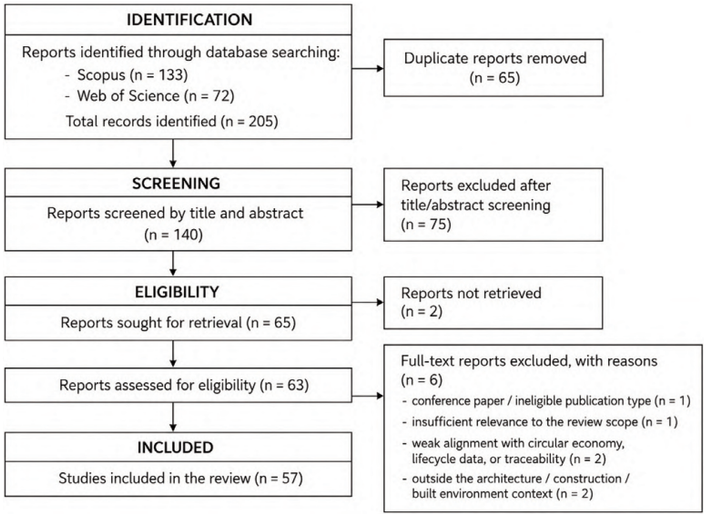


Fig. 5 | PRISMA 2020 flow diagram of the Study Selection Process (credits: the Authors, 2026).

Main Category	Sub-category	No. of Articles	Content Summary
A. Paper type	Conceptual	8	Studies addressing the conceptual boundaries, theoretical models, and core visions of passport and digital logbook systems, with an emphasis on their theoretical foundations over empirical data
	Methodological	15	Studies that design new data architectures, computational algorithms, artificial intelligence (AI/LLM) models, ontologies, and BIM-based visual programming workflows
	Empirical	14	Studies that examine the practical implementation of these systems through interviews, focus groups, fieldwork, social housing pilot projects, and real-world case analyses
	Review	20	Studies that present systematic literature reviews (SLRs), bibliometric analyses, and broad comparative assessments of existing European Union initiatives
Total (A)		57	

Tab. 1 | Distribution of the 57 reviewed studies by publication type (credit: the Authors, 2026).

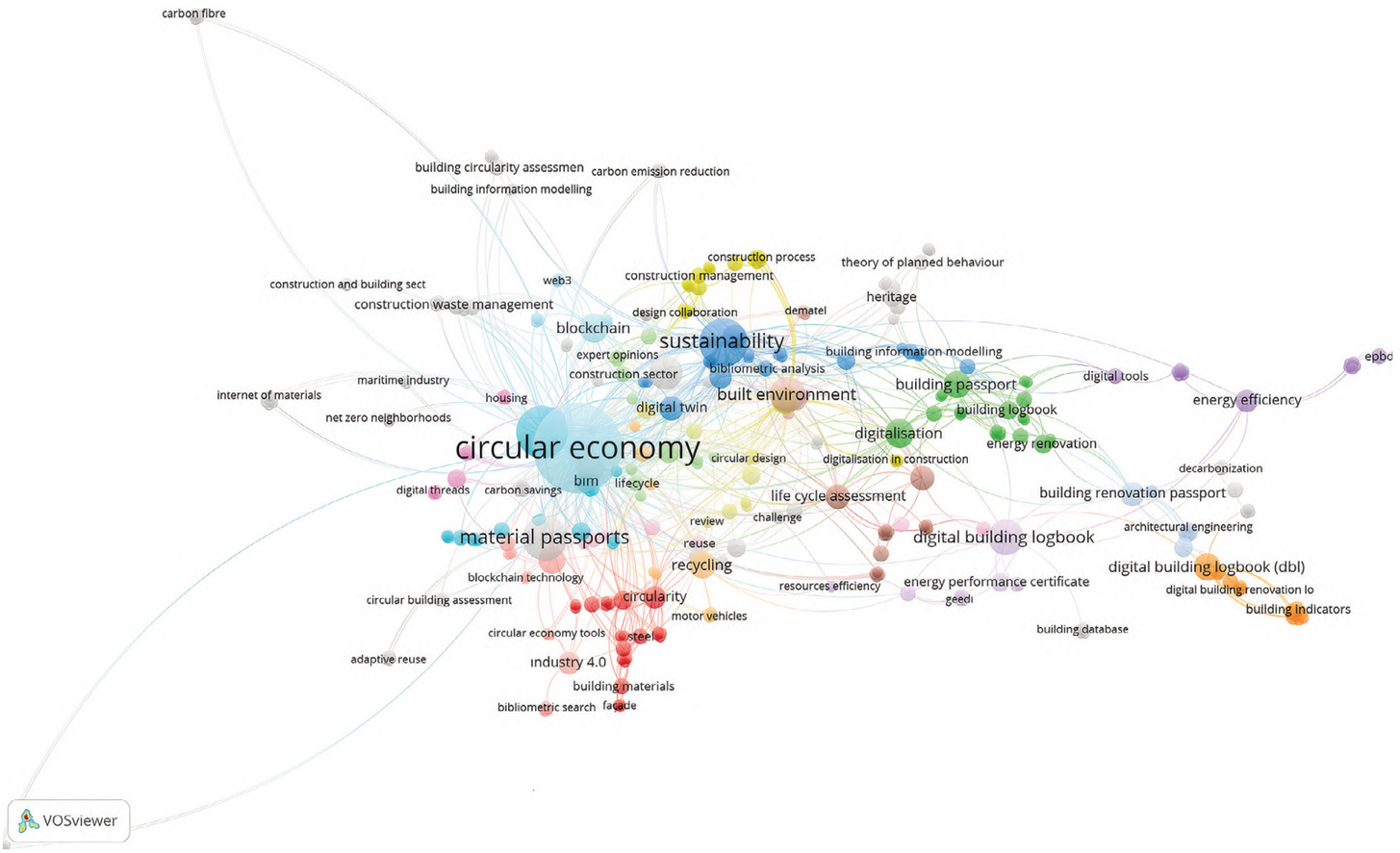


Fig. 6 | Keyword co-occurrence map (credits: produced from VOSviewer by the Authors, 2026).

In response to this structural deficiency, documentation tools such as building passports, material passports, and digital building logbooks are becoming increasingly visible (Buchholz and Lützkendorf, 2023). The digitalisation shaped around these tools refers not only to the production of static documents or inventories, but also to the establishment of a multilayered data infrastructure supported by technologies such as BIM or Digital Twin (Rigillo, Galluccio and Paragliola, 2023; Çetin et alii, 2026). Through interoperability across systems and dynamic data ecosystems, these tools can provide decision-support mechanisms for the reuse of components and support longer-term governance processes throughout the life cycle (Paganin et alii, 2024). Accordingly, digital information systems have the potential to make building processes more transparent, traceable, and manageable by strengthening data-driven decision-making capacity (D'Amore, 2025; Osello et alii, 2024).

A review of the literature shows that studies focusing on building passports and digital information systems are largely shaped around technical dimensions such as data architecture, ontologies, and technological integration. In contrast, the line of literature addressing social housing, housing justice, and urban inequalities has progressed largely separately from these discussions on technical and digital infrastructures (Veliz Reyes et alii, 2025; Çetin, Gruis and Straub, 2022). This suggests that studies that holistically evaluate the effects of circular approaches and advanced data ecosystems in contexts with differing levels of institutional capacity and disadvantaged social groups remain limited. Based on this gap, this article aims to present a systematic synthesis that reads the literature on building passports, material passports, and digital building logbooks together through the lenses of the circular economy and social equity.

The analytical value of considering these tools jointly lies in the fact that, despite their differences in scale and emphasis, they reveal a shared socio-technical field structured by life-cycle data, traceability, interoperability, governance, and decision support across material, product, and building scales. Rather than simply reviewing the literature on these topics, the study provides a socio-technical and distributive reinterpretation of issues that have predominantly been addressed from a technical and informational perspective. This conceptual positioning is summarised in Figure 1, which situates building passports, material passports, and digital building logbooks within a shared socio-technical field between circular economy and social equity.

In this framework, equity is approached not as an external normative addition, but as an analytical lens that helps reorient the interpretation of the field. More specifically, the study considers equity across three interrelated dimensions: distributive equity, concerning costs, benefits, and access to information; procedural equity, concerning governance, participation, and rights over data; and infrastructural or capacitive equity, concerning institutional capacity, digital literacy, and fragile implementation contexts. Figure 2 translates these three equity dimensions into an analytical matrix by relating distributive, procedural and infrastructural/capacitive equity to costs, data access, governance, institutional capacity, and digital literacy in passport-enabled systems.

Drawing on a systematic literature review of 57 articles, the study examines how these tools intersect with issues such as data ownership, institutional governance, the digital divide, and uneven institutional capacity for implementation. From this perspective, the article contributes to the evaluation of these systems not merely as operational data repositories, but as socio-technical infrastructures with reference to the combined relevance of SDG 9 and SDG 10. Accordingly, the article first presents the theoretical positioning and methodological framework, then sets out the bibliometric and thematic findings, and finally discusses these findings through the dimensions of implementation, governance, and equity within the SDG 9-10 axis.

Theoretical positioning: from technical tools to socio-technical infrastructure | In the built environment, the circular economy stands out as a life-cycle-oriented approach that covers the process from the design of buildings to the end of their service life (Gasue et alii, 2026). The main objective of this approach is to maximise the reuse and recovery of building components while ensuring an uninterrupted flow of information throughout this process (van Capelleveen et alii, 2023). In order to manage this flow of information within complex supply chains without loss, the integration of circular

strategies with digital technologies has become a critical necessity (Keles, Cruz Rios and Hoque, 2025; Çetin et alii, 2026). Digital building logbooks (DBLs), building passports (BPs), and material passports (MPs), which have been developed to address information asymmetry in the sector, are fundamentally based on differences in scale at the building, product, or material level (Markou, Sinnott and Thomas, 2025). Although there is a clear conceptual overlap and terminological ambiguity among these tools in the literature, their purposes are largely shared (Nadais et alii, 2026). Therefore, these digital tools should be considered not as isolated and independent data repositories, but as hierarchical and interrelated information ecosystems extending from the product scale to the building scale (Gómez-Gil, Espinosa-Fernández and López-Mesa, 2022a; Buchholz and Lützkendorf, 2023). Figure 3 clarifies this multiscale relationship by positioning material passports across material and component / product scales, building passports at the building scale, and digital building logbooks as a cross-cutting record layer that integrates and updates information throughout the building life cycle.

In housing systems, the notion of equity is directly related to how life cycle costs, maintenance responsibilities, and the right to access structural information are distributed among actors (Çetin, Gruis and Straub, 2022; Nadais et alii, 2026). Inequalities observed in access to digital infrastructures and the deepening digital divide may restrict the participation of disadvantaged groups in qualified decision-making processes (Gasue et alii, 2026; Wandiga, 2020). For this reason, the technical tools designed to ensure transparency in the sector have not only operational outcomes, but also distinct social impacts that affect the distribution of resources and benefits (Çetin et alii, 2023; Barbosa and Almeida, 2025).

The complex structure of passport systems requires these tools to be read as socio-technical infrastructures rather than as neutral data repositories or merely technical software (Veliz Reyes et alii, 2025; Çetin et alii, 2026). The successful functioning of the system depends on the institutional capacity of organisations, stakeholder coordination among actors, the fair distribution of data ownership rights, and transparent governance conditions (Lu et alii, 2023; van Capelleveen et alii, 2023; Mêda et alii, 2024a). This system-of-systems logic is illustrated in Figure 4, where passport-enabled socio-technical infrastructure is positioned as an implementation ecosystem linking BIM, digital twins, interoperable standards, data management, governance, actors, policy / regulation and emerging technologies such as blockchain / Web3. In other words, the hardware and technical capacity offered by digitalisation alone is not sufficient; the simultaneous establishment of the socio-economic and administrative framework needed to realise the potential of these tools emerges as a fundamental necessity (Çetin et alii, 2026; Aklashie et alii, 2026).

Methodology | The study adopts a systematic literature review, supplemented by bibliometric mapping and thematic coding. The methodological framework was constructed to ensure the verifiability of the entire process of selection, analysis, and interpretation of the corpus. The review does not aim to measure the effectiveness of interventions or produce a quantitative hierarchy of evidence, but rather to reconstruct research orientations, conceptual frameworks, bibliographic proximities, and recurring themes related to building passports, material passports, and digital building logbooks, examined through the lenses of the circular economy and social equity.

The review protocol was organised into four sequential phases, consistent with the PRISMA logic: identification, screening, eligibility, and inclusion. The bibliographic search was conducted on March 10, 2026, across the Scopus and Web of Science databases, using the same search string in both platforms: 'building passport' OR 'material passport' OR 'digital building logbook' OR 'building logbook'. This search string was defined to capture the primary terminologies for the documentation and traceability tools discussed in the literature on the built environment.

The database search yielded 133 records from Scopus and 72 records from Web of Science, totalling an initial 205 records. These results were exported in CSV format, merged in Microsoft Excel, and manually checked for duplicates. The removal of 65 duplicates resulted in a dataset of 140 unique records, which were then screened by title and abstract. Inclusion criteria considered: studies published between 2015 and 2025; texts in English; contributions classified as 'article' or 'review article'; direct relevance to building passports, material passports, digital building logbooks, life cycle data, traceability, interoperability, governance, circular economy, infrastructure innovation, or distributive implications. Records were excluded when search terms appeared marginally or in areas not directly pertinent to architecture, construction, or the built environment. Disciplines not aligned with the scope of the review were also excluded: Materials Science (8), Mathematics (5), Physics and Astronomy (4), Chemical Engineering (4), and Earth and Planetary Sciences (2).

During the screening phase, 75 records were excluded based on their titles and abstracts. The remaining 65 studies were considered eligible for full-text evaluation; of these, 2 were not retrieved due to unavailability of the full text, leaving 63 texts for evaluation. Six studies were subsequently excluded for insufficient alignment with the scope of the review, particularly for their weak connection to the circular economy, life cycle data, traceability, or the architectural, construction, and built environment context. The final corpus thus consisted of 57 studies. The entire selection process is summarised in the PRISMA diagram (Fig. 5).

The screening was jointly conducted by the two authors. Uncertainty cases were discussed until a shared consensus was reached, aiming to reduce individual discretion in the selection of the corpus. For each record, the following were verified: consistency with the research question, relevance to the material / product / building scale, presence of life cycle data or traceability content, and relevance to governance, implementation, or socio-distributive implications. The included studies were then evaluated comparatively across four aspects: relevance to the research focus, conceptual clarity, methodological transparency, and

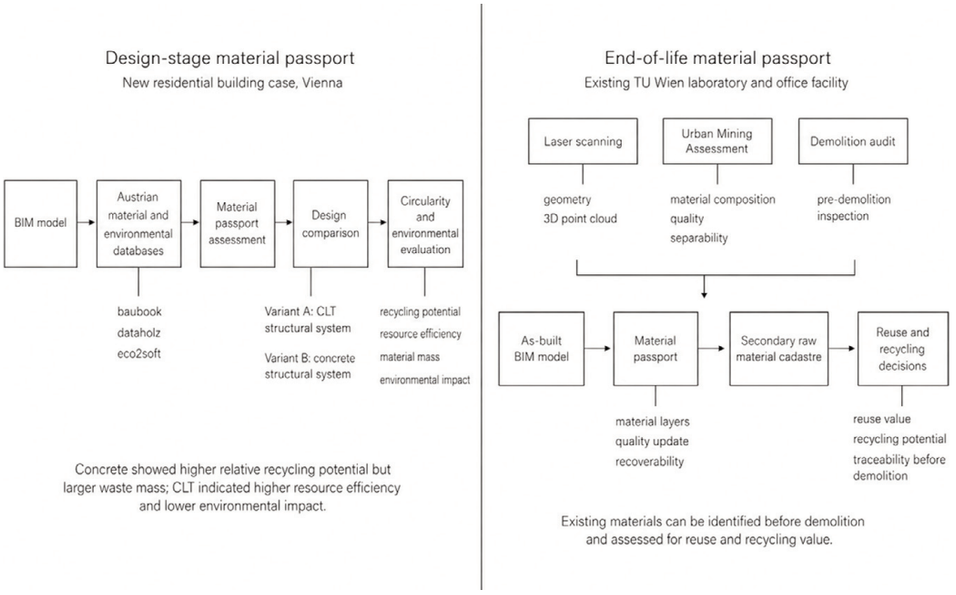


Fig. 7 | Austrian material passport cases showing how BIM, material databases and urban mining assessment can support material traceability, reuse potential, and recycling decisions (credit: the Authors, 2026).

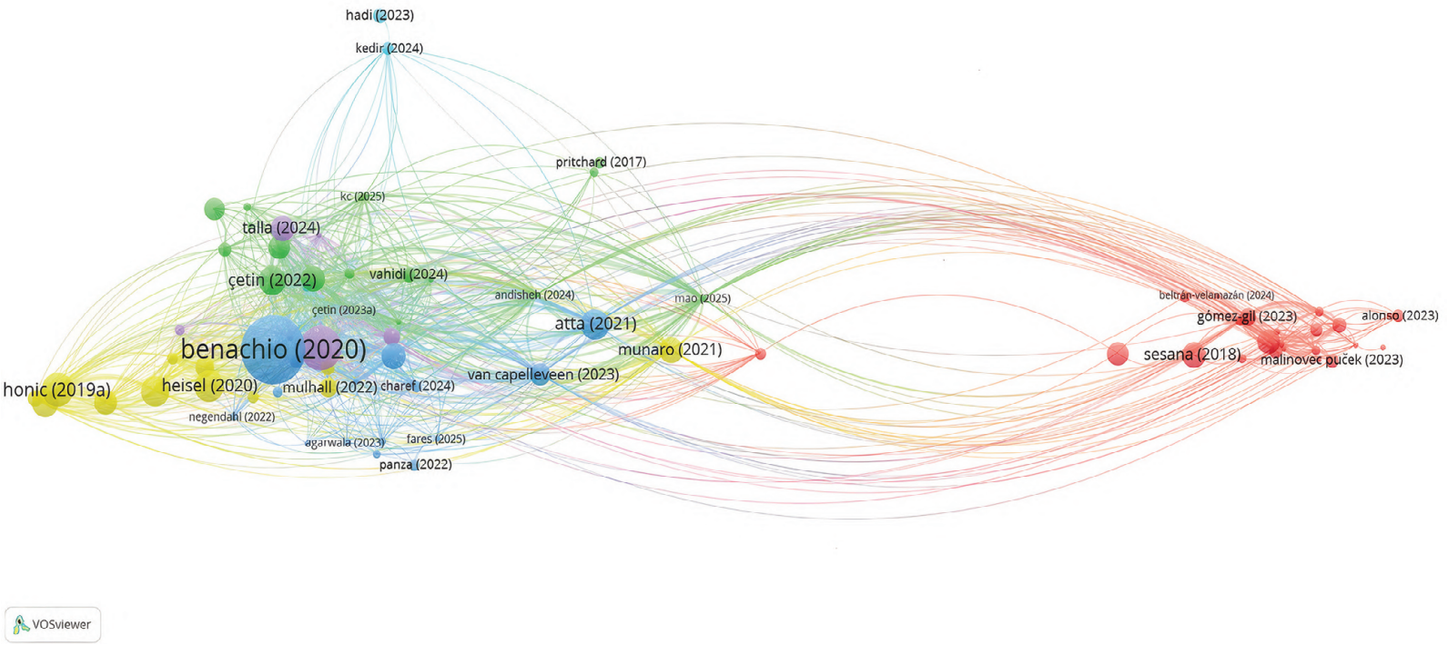


Fig. 8 | Bibliographic coupling map (credits: produced from VOSviewer by the Authors, 2026).

contribution to thematic synthesis. No quantitative quality assessment was applied, nor were scores assigned to individual articles. This choice reflects the exploratory and interpretative nature of the review, which focuses on mapping configurations and relationships in the field, rather than evaluating the effectiveness of specific interventions. This approach also constitutes a methodological limitation: the results should be read as a structured synthesis of the field, rather than as a graduated classification of evidence robustness.

The bibliometric component was used to support the descriptive analysis of the corpus and to highlight relationships between terms, documents, and research clusters. Keyword co-occurrence maps and bibliographic coupling visualisations were generated using VOSviewer 1.6.20; the visualisation was based on the Scopus dataset, using the same search logic applied in the systematic review. This choice served a technical function, given the higher number of records returned by Scopus and better metadata compatibility with VOSviewer. It did not restrict the final corpus, which resulted from the integration of both Scopus and Web of Science.

The co-occurrence map was produced using authors' keywords, with a minimum occurrence threshold of two; the bibliographic coupling map was generated at the document level, identifying proximity between studies based on shared references. In both cases, the default VOSviewer settings were maintained. No thesaurus file was used; however, before interpretation, the keywords were manually checked to eliminate evident overlaps and non-substantial terminological variants. The maps were considered as descriptive and analytical orientation tools, rather than self-sufficient results.

Thematic coding was developed in two steps: in the first step, each article was examined in relation to its main focus, the scale of analysis, the technical emphasis, the governance dimension, the implementation context, and its treatment of equity issues; in the second step, recurring patterns were grouped into broader thematic categories. This process led to the identification of six main clusters, which were used as the analytical structure for the results and are reported in Table 2. Each article was assigned to the cluster that best expressed its dominant contribution, and when a text presented multiple relevant dimensions, the assignment was based on the theme most developed in the contribution.

To clarify the interpretive level of the analysis, the study distinguishes three levels: results directly observable in the corpus and bibliometric visualisations; authorial syntheses derived from recurring configurations; and interpretative inferences developed from the overall structure of the examined literature. In this framework, equity was not only coded as an explicitly present term in the articles but as an analytical lens articulated in distributive, procedural, and infrastructural dimensions. This distinction clarifies which results derive directly from bibliographic data and which constitute a critical reworking proposed by the authors.

Results | Review studies constitute the largest group with 20 articles, followed by 15 methodological, 14 empirical, and 8 conceptual studies. This distribution shows that the field has developed a research basis that is theoretical as well as methodological and practice-oriented. As shown in Table 1, this distribution is used to profile the reviewed corpus rather than to infer thematic dominance within the field.

The bibliometric results derived from the Scopus-based VOSviewer mapping are presented through keyword co-occurrence and bibliographic coupling visualisations, which were used to evaluate conceptual clusters and bibliographic proximities among studies. The keyword co-occurrence network presented in Figure 6 shows that the term circular economy is located at the conceptual centre of the literature. The concentration of terms such as 'sustainability', 'built environment', 'life cycle assessment', 'BIM', 'digital twin', 'digitalisation', and 'blockchain' around this concept indicates that the literature clusters around sustainability, life cycle assessment, and digital data infrastructure. The map also reveals that passport-oriented tools do not form a single homogeneous block. While the concepts of 'building passport', 'building logbook', and 'digital building logbook' are more closely associated with 'digitalisation', 'building information modelling', 'energy renovation', 'energy efficiency', and 'energy performance certificate', the concept of 'material passports' is positioned more closely in relation to BIM, blockchain, construction waste management, lifecycle, and material-oriented circularity debates. This pattern indicates that the building passport and digital logbook literature has developed more along the axis of building performance, renovation, and digital information management, whereas the material passport literature has developed along the axis of material traceability, data architecture, and resource circularity.

The Austrian material passport cases further illustrate how this material-oriented strand operates across both design-stage material comparison and end-of-life urban mining assessment, linking BIM-based documentation, material and environmental databases, and reuse or recycling decisions (Fig 7). The more limited visibility of concepts related to the dimension of social justice and equity in the network also shows that technical, environmental, and digital focuses are dominant in the literature. These observations are descriptive results of the mapped dataset; their broader socio-technical implications are discussed in the following sections.

The bibliographic coupling analysis conducted on the Scopus dataset shows how the proximity among studies is shaped based on shared references (Fig. 8). The map reveals that, rather than consisting of a homogeneous structure, the liter-

Theme	No. of Articles	Article Filenames	Short Descriptıon
1. Conceptual Framing and Evolution of Tools	11	Markou et alii, 2025; Keles et alii, 2025; Abd El-Hameed, 2025, Buchholz and Lützkendorf, 2023; Mêda et alii, 2021; Aftab and Agliata, 2026; Mankata et alii, 2025; Gómez-Gil et alii, 2022; KC et alii, 2025a; van Capelleveen et alii, 2023; Nadais et alii, 2026	These articles (mostly systematic reviews and bibliometric analyses) were assigned to this theme because they map the historical evolution of passport concepts, the theoretical frameworks of digital tools, the boundaries between tools, and terminological distinctions (e.g., Aftab and Agliata, 2026, trace conceptual evolution bibliometrically)
2. Data Architecture and Framework Design	10	Malinovec Puček et alii, 2023; Senarathne et alii, 2025; Atta et alii, 2021; Gómez-Gil et alii, 2024a; Mao and Cao, 2025; Honic, Kovacic and Rechberger, 2019; Espinoza-Zambrano et alii, 2023, Munaro and Tavares, 2021; Karami et alii, 2025; Senarathne, Weerasinghe and Zhang, 2025	These studies are grouped in this category because they structurally define the relational database schemas (DBrL), 4/6-level data hierarchies, modules, and the required quantitative/qualitative data parameters that constitute the background for digital systems to function
3. Technological Integration and Interoperability	9	Ferreira Alves et alii, 2025; Sanchez et alii, 2024; Mêda et alii, 2024b; Atta et alii, 2025; Kovacic, Honic and Sreckovic, 2020; Urlainis et alii, 2025; Ugliotti and Stradiotto, 2025; Çetin et alii, 2026; Vahidi et alii, 2024	The articles in this group belong to this theme because they focus on the integration of advanced software / hardware technologies such as Artificial Intelligence (AI/LLM), Computer Vision, openBIM, ontologies, and RFID, and provide solutions to the interoperability problems of different systems
4. Governance, Data Ownership, and Institutional Capacity	11	KC et alii, 2026, Honic et alii, 2019; Lu et alii, 2023; Veliz Reyes et alii, 2025; Byers and de Wolf, 2023; KC et alii, 2025b; Barbosa and Almeida, 2025; Gómez-Gil et alii, 2023; Alonso et alii, 2023; Aklashie et alii, 2026; Mêda et alii, 2024a	This cluster was grouped under the governance theme because it addresses organizational and legal boundaries such as decentralized data ownership management through Blockchain / Web3, trust among stakeholders (e.g., cross-border trade), institutional capacity, socio-cultural resistances, and FAIR principles
5. Policy Impact and Implementation Contexts	12	Gómez-Gil et alii, 2024b; Sesana and Salvalai, 2018; dos Santos Gonçalves et alii, 2021; Gómez-Gil et alii, 2022b; Andisheh, 2024; Topraklı, 2024; Beltrán-Velamazán et alii, 2024; Honic et alii, 2021; Luscuere, 2017, Lavikka et alii, 2025; Signorini et alii, 2025; Violano et alii, 2026	These sources were placed under the implementation context theme because they examine EU decarbonization policies, national energy models, heritage building restorations, real-world pilot applications (Esenler Arena, New Zealand steel, etc.), and policy impacts in relation to SDG goals
6. Equity, Social Housing, and Inclusion	4	Çetin et alii, 2023; Çetin et alii, 2022; Gasue et alii, 2026; Wandiga, 2020	These articles fall under this theme because they directly examine issues of equity and inclusion by focusing on systemic barriers in developing countries (e.g., Ghana), the digital readiness of social housing organizations, and disadvantaged local/cultural dynamics

Tab. 2 | Distribution of the 57 reviewed studies according to thematic findings (credit: the Authors, 2026).

ature is composed of groups of studies clustered around a common core while developing different sub-orientations. The map indicates bibliographic proximity based on shared references rather than direct intellectual influence or author collaboration. At the centre of the network, Benachio (2020), Atta, Bakhoum and Marzouk (2021), Çetin, Gruis and Straub (2022), and Talla and McIlwaine (2024) stand out as the most visible nodes of bibliographic convergence within the field In contrast, the more distinct cluster shaped around Sesana and Salvalai (2018), Gómez-Gil et alii (2023), Alonso et alii (2023), and Malinovec Pucek et alii (2023) points to a more specific bibliographic orientation in the literature. This view shows that the literature on building passports, material passports, and digital building logbooks does not follow a single linear trajectory of development, but contains research lines that share common reference clusters while diverging in terms of their focus.

Thematic coding showed that the 57 articles are concentrated around six main clusters. As presented in Table 2, the thematic distribution provides the main interpretative structure through which the reviewed corpus was organised. This structure reveals that the literature extends across data architecture, technological integration, governance, implementation contexts, and, to a more limited extent, the dimensions of equity and inclusion. Taken together, the thematic distribution indicates that the field remains predominantly oriented towards technical system design, interoperability, governance, and implementation issues (Veliz Reyes et alii, 2025; Çetin et alii, 2026; Luscuere, 2017). By contrast, the theme of 'equity, social housing and inclusion' is less extensively represented than the more technical and administrative themes (Gasue et alii, 2026; Wandiga, 2020).

Nevertheless, although studies focusing on the social inclusion and distributional effects of digitalisation remain fewer in number, they constitute an important and emerging line of research that supports the fairer implementation of passport and logbook tools in the sector (Çetin et alii, 2023; Çetin, Gruis and Straub, 2022). This does not reduce the analytical importance of the equity-oriented studies; rather, it indicates that they remain a smaller but significant strand within the current literature.

Operationalising equity in passport-enabled systems | The reviewed literature suggests that the integration of digital building logbooks and passport systems is relevant not only as a technical issue, but also in relation to how information transparency, access, and responsibility are organised in socially unequal contexts (Çetin, Gruis and Straub, 2022; Barbosa and Almeida, 2025). These tools offer various operational mechanisms that support the housing rights of disadvantaged groups and the fair distribution of resources by operationalising circular construction strategies at the socio-economic level.

The operationalisation of equity works primarily by creating transparency in the life cycle costs of buildings, thereby enabling actors such as social housing providers to optimise maintenance and renovation decisions in relation to affordability (Gómez-Gil, Espinosa-Fernández and López-Mesa, 2022a; Çetin, Gruis and Straub, 2022; Gómez-Gil et alii, 2024a; Gasue et alii, 2026; Nadais et alii, 2026). However, for this transparency to be fair, new institutional collaborations are required to ensure that data updating responsibilities and maintenance burdens within the system are distributed in a balanced manner among stakeholders in the supply chain (Honic et alii, 2019; Veliz Reyes et alii, 2025; Espinoza-Zambrano, Marmolejo-Duarte and García-Hooghuis, 2023; van Capelleveen et alii, 2023).

At the same time, the governance of the collected data in line with FAIR principles and the establishment of inclusive, decentralised digital rights management in order to overcome information asymmetry create an infrastructure for democratic access to information (Abhishek et alii, 2026; Lu et alii, 2023; Senarathne, Weerasinghe and Zhang, 2025; Buchholz and Lützkendorf, 2023; Alonso et alii, 2023; Aklashie et alii, 2026). Finally, by digitalising secondary material markets and local repair networks, these systems support the establish-

ment of local circular value chains that generate direct social benefits, especially in developing regions (Gómez-Gil et alii, 2024b; Çetin et alii, 2023; Mao and Cao, 2025; Mankata et alii, 2025). The Dutch social housing case further illustrates how digital and passport-related tools may support maintenance, renovation, and reuse decisions in affordable housing contexts, while also revealing the importance of organisational capacity in implementation (Fig. 9).

From concept to implementation: a systemic framework | The practical adoption of passport and digital logbook systems requires that these tools be considered not merely as technological software, but as socio-technical infrastructures in which the dimensions of technology, process, and actors work together (Veliz Reyes et alii, 2025; Çetin et alii, 2026). Relevant studies show that successful integration depends not only on technical capacity, but also on institutional coordination, clear definitions of responsibility, and user-oriented operation (Çetin et alii, 2026; Mêda et alii, 2024a). For this reason, common data standards, trust among stakeholders, and workable governance arrangements play a decisive role in the functioning of the system (Veliz Reyes et alii, 2025; Çetin et alii, 2026; Mêda et alii, 2024a). Figure 10 makes these implementation conditions more concrete by mapping key actors in passport-enabled systems against access rights, update obligations, potential benefits, and risks within a broader governance and data ownership framework.

The operationalisation of circular processes through passport systems is directly related not only to environmental sustainability but also to social equity goals (Lavikka et alii, 2025; Nadais et alii, 2026). By providing more visible data on the building stock, life cycle costs, and material quality, passport systems reduce information asymmetry (Çetin, Gruis and Straub, 2022; Lavikka et alii, 2025), which may support the decision-making capacity of disadvantaged groups in relation to housing. In this context, equity should be considered not only in terms of the technical performance of the system, but also together with how costs, responsibilities, and access rights are organised (van Capelleveen et alii, 2023; Nadais et alii, 2026).

When the findings in the literature are synthesised, the authors propose a holistic framework, based on a 'system-of-systems approach', for discussing the effective and scalable implementation of passport systems (Çetin et alii, 2026). The proposed architecture is based on the integration of Building Information Modelling (BIM) for data design, Digital Twins for operational condition monitoring, and blockchain technologies for the transparent verification of data (Abhishek et alii, 2026; Senarathne et alii, 2025; Aklashie et alii, 2026).

Within this framework, the minimum indicators that may help evaluate passport-based systems in terms of equity and implementation capacity can be summarised as life cycle cost transparency, clarity of responsibility for data updating, the definition of rights of access to building information, the visibility of data supporting reuse, and maintenance decisions, and the level of connection established with local circular value chains. However, the functioning of this model depends on ensuring open interoperability among systems, supporting data standardisation, and establishing appropriate governance and regulatory frameworks (Çetin et alii, 2026). The comparative cases of Aragon (Spain) and Lombardy (Italy) further show that DBL implementation depends not only on the existence of building-related data sources, but also on their openness, interoperability, integration capacity, and regional data governance structure (Tab. 3).

Governance, risks, and trade-offs | The real-world implementation of the proposed socio-technical framework, while ensuring traceability among stakeholders, requires careful consideration of complex trade-offs shaped by institutional boundaries, governance risks, and unequal effects (Veliz Reyes et alii, 2025; Çetin, Gruis and Straub, 2022; Çetin et alii, 2026; Barbosa and Almeida, 2025). In addition, in the context of the sensitivity of building data, the principles of privacy and data protection, data stewardship responsibilities, and power asymmetries among actors are also fundamental issues that need to be considered within the governance framework of these systems. Otherwise, rather than producing solutions, passport systems may also generate a risk of techno-solutionism that reproduces existing inequalities through digital tools. More specifically, the literature points to three recurrent tensions: interoperability versus management costs, transparency versus confidentiality, and digital innovation versus unequal institutional capacity. These recurrent tensions are summarised in Figure 11 as three governance trade-offs that must be balanced in the implementation of passport-enabled systems.

The main limitations affecting the functioning of this framework are professional resistance within the sector, insufficient training, and limited organisational capacity, which make stakeholder coordination difficult (Markou, Sinnott and Thomas, 2025; Honic et alii, 2019; Gasue et alii, 2026). In addition, the tension between commercial confidentiality and transparency in complex supply chains creates serious governance risks around data ownership and access rights, while decentralised technologies proposed as trust mechanisms limit practical applicability due to high costs and legal uncertainties (Lu et alii, 2023; Senarathne et alii, 2025; Aftab and Agliata, 2026; van Capelleveen et alii, 2023; Alonso et alii, 2023; Aklashie et alii, 2026). All these technical and administrative barriers lead to the adoption of advanced information systems in high-budget projects rather than in social housing projects with limited budgets or in developing countries, thereby creating a deep digital divide and a problem of unequal actor capacities, so that the tools cannot be implemented to the same extent for everyone (Markou, Sinnott and Thomas, 2025; Çetin, Gruis and Straub, 2022; Gasue et alii, 2026; Lavikka et alii, 2025).

Implications for the SDGs: synergies, trade-offs, and governance conditions | The relevance of passport-enabled systems to the SDGs does not arise as an external policy layer added to the review, but follows from the analysis of how these systems reorganise information, responsibilities, and capacities across the built environment. Passport-enabled systems carry critical meanings for SDG 9 and SDG 10 as strategic mechanisms that guide the socio-economic transformation of the built environment (Gasue et alii, 2026; Çetin et alii, 2026). The ways in which these tools reshape information asymmetry, transparency, and justice in the sector lie at the intersection of these two global goals (Nadais et alii, 2026).

In the context of SDG 9, passport systems provide a dynamic digital infrastructure that meets interoperability requirements by increasing the innovation capacity of the sector (Çetin et alii, 2026; Aklashie et alii, 2026). However, the transformative potential of this technological integration remains limited in practice unless it is supported by common data standardisation and strong institutional capacity (Çetin et alii, 2026). Therefore, the successful functioning of innovative digital ecosystems depends not only on technological infrastructures, but also on the establishment of an inclusive social and administrative ground (Çetin et alii, 2026).

When evaluated from the perspective of SDG 10, the transparency created by digital tools in life cycle costs and access to information has the potential to support the decision-making capacity of

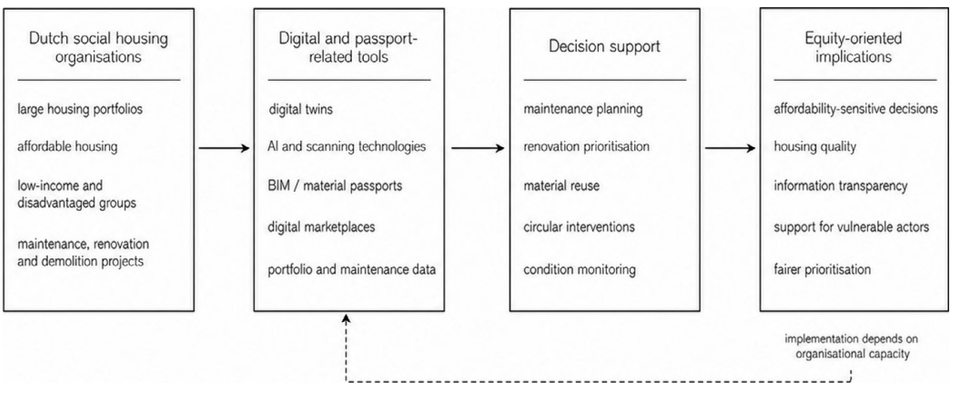


Fig. 9 | Dutch social housing organisations as an equity-oriented case linking digital tools, circular housing management, and decision-support capacity (credit: the Authors, 2026).

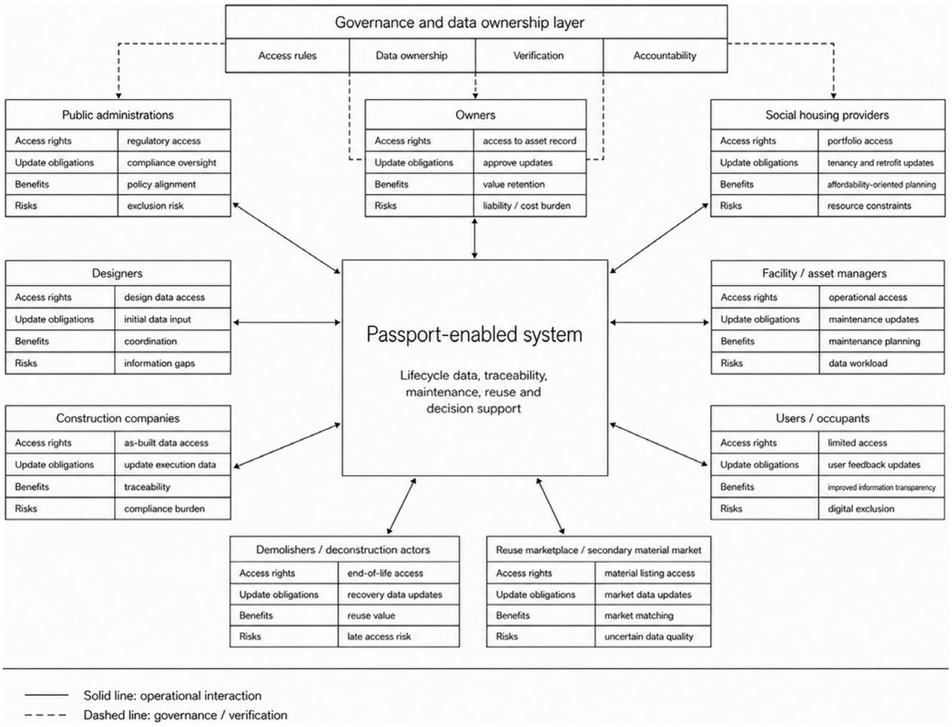


Fig. 10 | Actor-responsibility map showing access rights, update obligations, benefits, and risks in passport-enabled systems (credit: the Authors, 2026).

Comparison dimension	Spain (Aragon case)	Italy (Lombardy case)
1. Data availability and coverage	40% of 83 key indicators available (33/83); strongest in general and administrative information	35% of 83 key indicators available (29/83); strongest in technical systems and smart readiness
2. Open data share / transparency	36% of retrievable data openly accessible	90% of retrievable data openly accessible
3. EPC management and format	Regional EPC management; EPC data stored in XML	Regional EPC management; EPC data stored in XML
4. Interoperability of core registries	Regional EPC and technical system registries highly interoperable; open APIs; suitable for DBL integration via XML/JSON	CEER and CURIT highly interoperable; open APIs; suitable for DBL integration via XML/JSON
5. Land registry / cadastre integration	Not directly integrable due to lack of open APIs and unrestricted free exchange	Not directly integrable due to lack of open APIs and unrestricted free exchange
6. Building-scale information tools	Building Logbook for new or existing buildings	Building Dossier as a voluntary building file
7. Distinctive strength / best practice	Broader overall data coverage	CURIT identified as a best-practice model due to detailed building systems data
Shared enabling condition: Regional EPC and technical system registries in both cases show strong interoperability and are suitable for DBL integration		
Shared limitation: Land registry and cadastre systems are not yet directly integrable in either case		

Tab. 3 | Comparative assessment of DBL-related data ecosystems in Spain and Italy (credit: the Authors, 2026).

disadvantaged groups (Çetin et alii, 2023; Barbosa and Almeida, 2025). However, increased cost visibility and access to data do not automatically produce social equity in the sector (Nadais et alii, 2026). The reduction of inequalities depends on the fair distribution of maintenance burdens among actors and on the design of systems through an operational framework that takes differences in institutional capacity into account (Çetin et alii, 2023; Barbosa and Almeida, 2025; Nadais et alii, 2026).

The transferability of passport systems across different socio-economic contexts shows a structure that is highly sensitive to context in terms of the policy validity of these tools (Çetin et alii, 2026). Standard models that produce successful outcomes in developed markets with strong institutional infrastructures may not generate the same transparency and efficiency in social housing projects with limited capacity or in developing regions (Gasue et alii, 2026; Nadais et alii, 2026). For this reason, the universal transferability of digital policy frameworks is not absolute, but requires evaluation together with local governance, socio-cultural boundaries, and differences in institutional capacity (Gasue et alii, 2026; Çetin et alii, 2026). The Ghana case makes this conditional transferability visible by showing that passport implementation depends on professional awareness, standardised material data, quality assurance, policy support, and integration (Fig. 12).

This relationship with SDGs 9 and 10 also produces indirect synergies and trade-offs with other Sustainable Development Goals. In particular, in terms of sustainable cities and communities (SDG 11), responsible consumption and production (SDG 12), and climate action (SDG 13), passport systems can provide positive contributions through material traceability, renovation planning, and resource efficiency. In contrast, when inequalities in access to digital infrastructures, data literacy, and institutional capacity are not adequately taken into account, these tools may create new trade-offs by

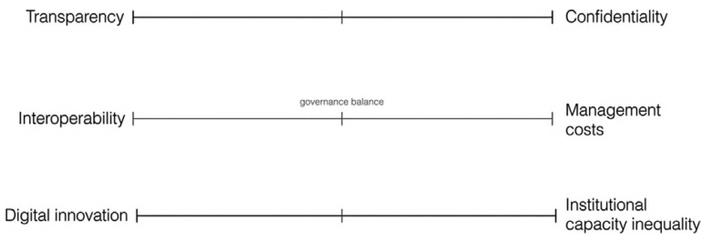


Fig. 11 | Governance trade-offs in passport-enabled systems (credit: the Authors, 2026).

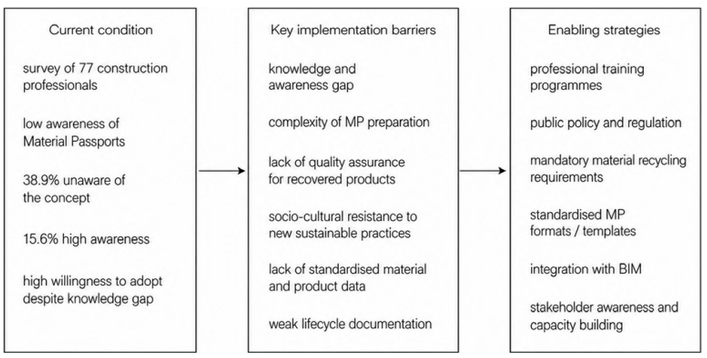


Fig. 12 | Ghana as a capacity-sensitive case showing barriers and enabling strategies for Material Passport implementation (credit: the Authors, 2026).

excluding some groups from the system rather than supporting equity.

Beyond the direct relevance of passport-enabled systems to SDGs 9, 10, 11, and 12, indirect effects and trade-offs may also emerge across other goals. Improved transparency and more inclusive access to building information may indirectly support SDGs 1 and 10 by reducing vulnerability in low-income housing contexts, SDGs 3 and 11 through healthier and better-maintained built environments, SDG 4 through the development of digital literacy and technical skills, SDG 5, where access to digital infrastructures and decision-making processes is unevenly distributed, SDG 7 through renovation and energy-efficiency planning, SDG 8 through the stimulation of circular labour and repair markets, SDG 13 through improved material traceability and decarbonisation pathways, SDG 16 through more transparent governance arrangements, and SDG 17 through interoperability and cross-sectoral collaboration.

However, such benefits remain conditional: where institutional capacity, data rights, digital inclusion, and governance safeguards are weak, passport systems may reproduce exclusion rather than support equitable transitions. For researchers, this section points to new questions on equity and institutional capacity; for technical experts, it suggests a checklist of minimum operational indicators; and for public administration, it offers a basis for defining criteria for public assets, tender requirements, and context-sensitive implementation conditions.

Conclusions | This study has presented a systematic literature review that evaluates the literature on building passports, material passports, and digital building logbooks together through the lenses of circular economy and social equity. The review of 57 articles selected from the Scopus and Web of Science databases shows that the literature has developed primarily around data architecture, technological integration, interoperability, governance, and implementation contexts, while equity, social housing, and inclusion remain comparatively underrepresented. The bibliometric mapping also revealed that circularity, sustainability, and digitalisation occupy the conceptual centre of the literature, whereas social justice and distributional effects are less visible. Read jointly, passport systems reveal a shared socio-technical field structured by life-cycle data, traceability, interoperability, governance, and decision support across material, product, and building scales. The findings show that it is insufficient to treat these tools merely as technical repositories or neutral data containers. Beyond simply organising information, passport systems may also reshape responsibilities, maintenance burdens, decision-making power, and access to circularity opportunities among different actors. In this sense, the contribution of the paper lies not only in reviewing the literature, but in offering a socio-technical and distributive reinterpretation of a field that has predominantly been discussed on a technical and informational basis.

The equity dimension is central to this reinterpretation. It allows the field to be read not only in terms of technical performance, but also through the distribution of costs, benefits, and access to information; the governance of participation and data rights; and the uneven institutional and digital capacities through which these systems become operational. From this perspective, equity is not treated as an external normative addition, but as an analytical category that helps reorient the interpretation of the field. More specifically, the review suggests that equity in this field may be understood across three interrelated dimensions: distributive equity, concerning costs, benefits, and access; procedural equity, concerning governance, participation, and rights over data; and infrastructural or capacitive equity, concerning institutional capacity, digital literacy, and fragile implementation contexts.

At the same time, the review makes clear that digitalisation does not automatically produce fairer outcomes. The social effects of passport-enabled systems depend on how recurrent tensions are governed in practice, including interoperability versus management costs, transparency versus confidentiality, and digital innovation versus unequal institutional capacity. Within this framework, the relevance of the study to SDG 9 and SDG 10 emerges directly from the analysis rather than as an external policy layer. If passport systems are understood as socio-technical infrastructures that shape access, responsibilities, and institutional capacity, then their significance for innovation and infrastructure (SDG 9) and for reduced inequalities (SDG 10) follows directly from the findings. Their broader connections with SDGs 11, 12, and 13 likewise emerge through their implications for housing, renovation, material reuse, and resource efficiency. At the same time, weak governance arrangements, uneven digital literacy, and limited institutional preparedness may generate trade-offs that affect broader sustainability goals.

Finally, the scope of the review remains limited to English-language journal and review articles indexed in selected databases. Official national and international documents, institutional reports, and regulatory references were not included in the corpus to maintaining a manageable scope, although their incorporation would further deepen the discussion on policy impacts, implementation contexts, and public administration. Future research should therefore extend the field through broader empirical evidence, more transparent comparative analyses, and greater attention to fragile contexts such as social housing, low-income settings, and developing regions. Further work is especially needed to examine under which conditions passport-based systems may reduce inequalities, reproduce them, or generate new forms of exclusion.

Acknowledgements

This contribution was prepared jointly by the Authors as the result of a shared academic reflection and collaborative development process. The Authors recognise that national and international official documents, institutional reports, and regulatory references related to building passports, material passports, digital building logbooks, governance, and implementation could provide a broader framework for discussing policy impacts, implementation contexts, and public administration. However, these materials were excluded from the present study in order to maintain a manageable scope. National documents were not included because their Turkish-language content would require extended engagement with etymological and terminological debates. International documents, although available in English, were also excluded because of their large number and the risk of substantially expanding the scope and length of the manuscript.

References

Abd El-Hameed, A. K. (2025), "Digital technologies as supporting tools for resource circularity in the construction industry – A review reflecting on the building lifecycle", in *Journal of Building Engineering*, vol. 114, article 114420, pp. 1-26. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.jobe.2025.114420 [Accessed 30 March 2026].

Abhishek, K. C., Senaratne, S., Perera, S. and Nanayakkara, S. (2026), "Blockchain-Based Material Passports – A Review of Managing Built Asset Information for Material Circularity", in *Buildings*, vol. 16, issue 3, article 658, pp. 1-25. [Online] Available at: doi.org/10.3390/buildings16030658 [Accessed 30 March 2026].

Aftab, U. and Agliata, R. (2026), "Material passports for digital and circular construction – A bibliometric and thematic analysis", in *Journal of Cleaner Production*, vol. 543, article 147651, pp. 1-19. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.jclepro.2026.147651 [Accessed 30 March 2026].

Aklashie, S., Agyekum, K., Tchao, E. T., Adinyira, E. and Nani, G. (2026), "Blockchain-digital twin integration in construction material passports: preparing for digital product passport implementation", in *Built Environment Project and Asset Management*, vol. ahead-of-print, issue ahead-of-print. [Online] Available at: doi.org/10.1108/BEPAM-07-2025-0188 [Accessed 30 March 2026].

Alonso, R., Olivadese, R., Ibba, A. and Recupero, D. R. (2023), "Towards the definition of a European digital building logbook – A survey", in *Heliyon*, vol. 9, issue 9, article e19285, pp. 1-21. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e19285 [Accessed 30 March 2026].

Andisheh, K. (2024), "Development of steel circularity passport – Literature review, research gaps, and program rules in New Zealand", in *Waste Management Bulletin*, vol. 2, issue 3, pp. 11-27. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.wmb.2024.06.003 [Accessed 30 March 2026].

Atta, I., Bakhoum, E. S. and Marzouk, M. (2025), "Digital building logbook framework for energy efficiency and decarbonization using deep learning", in *Results in Engineering*, vol. 28, article 107709, pp. 1-35. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.rineng.2025.107709 [Accessed 30 March 2026].

Atta, I., Bakhoum, E. S. and Marzouk, M. M. (2021), "Digitizing material passport for sustainable construction projects using BIM", in *Journal of Building Engineering*, vol. 43, article 103233, pp. 1-13. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103233 [Accessed 30 March 2026].

Barbosa, G. and Almeida, M. (2025), "Strategies for implementing and scaling renovation passports – A systematic review of EU energy renovation policies", in *Sustainability*, vol. 17, issue 5, article 2289, pp. 1-28. [Online] Available at: doi.org/10.3390/su17052289 [Accessed 30 March 2026].

Battaino, C., Fossati, P. and Marconi, F. (2025), "Ripensare l'abitare – Progetto e architettura per un abitare flessibile e accessibile | Rethinking housing – Design and architecture for flexible and affordable living", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 17, pp. 156-167. [Online] Available at: doi.org/10.69143/2464-9309/17102025 [Accessed 30 March 2026].

Beltrán-Velamazán, C., Gómez-Gil, M., Monzón-Chavarrías, M., Espinosa-Fernández, A. and López-Mesa, B. (2024), "Harnessing Open European Data for a Data-Driven Approach to Enhancing Decarbonization Measurement in the Built Environment", in *Environmental and Climate Technologies*, vol. 28, issue 1, pp. 776-793. [Online] Available at: doi.org/10.2478/rtuect-2024-0060 [Accessed 30 March 2026].

Benachio, G. L. F., Freitas, M. do C. D. and Tavares, S. F. (2020), "Circular economy in the construction industry – A systematic literature review", in *Journal of Cleaner Production*, vol. 260, article 121046, pp. 1-17. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121046 [Accessed 30 April 2026].

Buchholz, M. and Lützkendorf, T. (2023), "European building passports – Developments, challenges and future roles", in *Buildings and Cities*, vol. 4, issue 1, pp. 902-919. [Online] Available at: doi.org/10.5334/bc.355 [Accessed 30 March 2026].

Byers, B. S. and De Wolf, C. (2023), "QR code-based material passports for component reuse across life cycle stages in small-scale construction", in *Journal of Circular Economy*, vol. 1, issue 2, pp. 1-16. [Online] Available at: doi.org/10.55845/IWEB6031 [Accessed 30 March 2026].

Çetin, S., Gruis, V. and Straub, A. (2022), "Digitalization for a circular economy in the building industry – Multiple-case study of Dutch social housing organizations", in *Resources, Conservation & Recycling Advances*, vol. 15, article 200110, pp. 1-15. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.rcradv.2022.200110 [Accessed 30 March 2026].

Çetin, S., Mêda, P., Farghaly, K. and Hwang, S.-A. (2026), "Linking digital product passports and digital building logbooks – Socio-Technical challenges and a pathways for integration", in *Developments in the Built Environment*, vol. 25, article 100877, pp. 1-12. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.dibe.2026.100877 [Accessed 30 March 2026].

Çetin, S., Raghu, D., Honic, M., Straub, A. and Gruis, V. (2023), "Data requirements and availabilities for material passports – A digitally enabled framework for improving the circularity of existing buildings", in *Sustainable Production and Consumption*, vol. 40, pp. 422-437. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.spc.2023.07.011 [Accessed 30 March 2026].

D'Amore, A. E. (2025), "Gemello digitale e processo edilizio – Riflessioni su produttività, energia e salute | The digital twin and the building process – Reflections on productivity, energy, and health", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 18, pp. 144-161. [Online] Available at: doi.org/10.69143/2464-9309/1872025 [Accessed 30 March 2026].

dos Santos Gonçalves, J., Mateus, R., Silvestre, J. D. and Roders, A. R. P. (2021), "Beyond good intentions – The role of the building passport for the sustainable conservation of built heritage to behavioural change", in *Sustainability*, vol. 13, issue 15, article 8280, pp. 1-19. [Online] Available at: doi.org/10.3390/su13158280 [Accessed 30 March 2026].

Espinoza-Zambrano, P., Marmolejo-Duarte, C. and García-Hooghuis, A. (2023), "Libro del Edificio Electrónico (LdE-e) – Advancing towards a comprehensive tool for the management and renovation of multifamily buildings in Spain", in *Sustainability*, vol. 15, issue 4, article 2957, pp. 1-26. [Online] Available at: doi.org/10.3390/su15042957 [Accessed 30 March 2026].

Ferreira Alves, G., Gripp, A. K., Munaro, M. R., Tavares, S. F. and Bragança, L. (2025), "Application of materials passport to the wood frame construction system using Revit and Dynamo", in *Buildings*, vol. 15, issue 23, article 4323, pp. 1-19. [Online] Available at: doi.org/10.3390/buildings15234323 [Accessed 30 March 2026].

Gasue, R., Aklashie, S., Dompey, A. M. A., Agyekum, K. and Opoku, D. (2026), "Implementing materials passports in the construction industry – Empirical evidence from Ghana", in *International Journal of Building Pathology and Adaptation*, vol. 44, issue 1, pp. 15-35. [Online] Available at: doi.org/10.1108/IJBPA-01-2024-0007 [Accessed 30 March 2026].

Gómez-Gil, M., Karami, S., de Almeida, J.-P., Cardoso, A., Espinosa-Fernández, A. and López-Mesa, B. (2024a), "Envisaging a European digital building renovation logbook – Proposal of a data model", in *Applied Sciences*, vol. 14, article 8903, pp. 1-33. [Online] Available at: doi.org/10.3390/app14198903 [Accessed 30 March 2026].

Gómez-Gil, M., Espinosa-Fernández, A. and López-Mesa, B. (2024b), "A new functionality for the digital building logbook – Assessing the progress of decarbonisation of national building sectors", in *Environmental Impact Assessment Review*, vol. 105, article 107393, pp. 1-14. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.eiar.2023.107393 [Accessed 30 March 2026].

Gómez-Gil, M., Espinosa-Fernández, A. and López-Mesa, B. (2022a), "Contribution of new digital technologies to the digital building logbook", in *Buildings*, vol. 12, issue 12, article 2129, pp. 1-20. [Online] Available at: doi.org/10.3390/buildings12122129 [Accessed 30 March 2026].

Gómez-Gil, M., Espinosa-Fernández, A. and López-Mesa, B. (2022b), "Review and analysis of models for a European digital building logbook", in *Energies*, vol. 15, issue 6, article 1994, pp. 1-24. [Online] Available at: doi.org/10.3390/en15061994 [Accessed 30 March 2026].

Gómez-Gil, M., Sesana, M. M., Salvalai, G., Espinosa-Fernández, A. and López-Mesa, B. (2023), "The Digital Building Logbook as a gateway linked to existing national data sources – The cases of Spain and Italy", in *Journal of Building Engineering*, vol. 63, part A, article 105461, pp. 1-22. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.jobe.2022.105461 [Accessed 30 March 2026].

Honic, M., Kovacic, I. and Rechberger, H. (2019), "Improving the recycling potential of buildings through Material Passports (MP) – An Austrian case study", in *Journal of Cleaner Production*, vol. 217, pp. 787-797. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.212 [Accessed 30 March 2026].

Honic, M., Kovacic, I., Aschenbrenner, P. and Ragossnig, A. (2021), "Material Passports for the end-of-life stage of buildings – Challenges and potentials", in *Journal of Cleaner Production*, vol. 319, article 128702, pp. 1-10. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128702 [Accessed 30 March 2026].

Honic, M., Kovacic, I., Sibenik, G. and Rechberger, H. (2019), "Data- and stakeholder management framework for the implementation of BIM-based Material Passports", in *Journal of Building Engineering*, vol. 23, pp. 341-350. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.jobe.2019.01.017 [Accessed 30 March 2026].

Karami, S., de Almeida, J.-P., Ellul, C. and Cardoso, A. (2025), "Semantic mapping-based comparison of digital building LogBook and energy performance certificate models – envisaging data reuse", in *Developments in the Built Environment*, vol. 22, article 100674, pp. 1-10. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.dibe.2025.100674 [Accessed 30 March 2026].

Keles, C., Cruz Rios, F. and Hoque, S. (2025), "Digital Technologies and Circular Economy in the Construction Sector – A Review of Lifecycle Applications, Integrations, Potential, and Limitations", in *Buildings*, vol. 15, issue 4, article 553, pp. 1-27. [Online] Available at: doi.org/10.3390/buildings15040553 [Accessed 30 March 2026].

Kovacic, I., Honic, M. and Sreckovic, M. (2020), "Digital Platform for Circular Economy in AEC Industry", in *Engineering Project Organization Journal*, vol. 9, issue 1, pp. 1-16. [Online] Available at: doi.org/10.25219/epoj.2020.00107 [Accessed 30 March 2026].

Lavikka, R., Fauth, J., Toscano, M., Costa, G., Beach, T., Meda Magalhães, P. and Stoter, J. (2025), "Navigating the shift towards sustainable digital building permits and building logbooks", in *Open Research Europe*, vol. 5, issue 90. [Online] Available at: doi.org/10.12688/openreseurope.18553.2 [Accessed 30 March 2026].

Lu, W., Peng, Z., Webster, C. and Wu, L. (2023), "Developing a construction waste material 'passport' for cross-ju-

risdictional trading", in *Journal of Cleaner Production*, vol. 414, article 137509, pp. 1-10. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137509 [Accessed 30 March 2026].

Luscuere, L. M. (2017), "Materials passports – Optimising value recovery from materials", in *Waste and Resource Management*, vol. 170, issue 1, pp. 25-28. [Online] Available at: dx.doi.org/10.1680/jwarm.16.00016 [Accessed 30 March 2026].

Malinovec Puček, M., Khoja, A., Bazzan, E. and Gyuris, P. (2023), "A data structure for digital building logbooks – Achieving energy efficiency, sustainability, and smartness in buildings across the EU", in *Buildings*, vol. 13, issue 4, article 1082, pp. 1-29. [Online] Available at: doi.org/10.3390/buildings13041082 [Accessed 30 March 2026].

Mangiatordi, A. (2025), "Investire nelle residenze per anziani – Verso una tassonomia ESG per la rigenerazione immobiliare | Investing in housing for the elderly – Towards an ESG taxonomy for building regeneration", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 18, pp. 130-143. [Online] Available at: doi.org/10.69143/2464-9309/1862025 [Accessed 30 March 2026].

Mankata, L. M., Antwi-Afari, P., Frimpong, S. and Ng, S. T. (2025), "Material passports in construction waste management – A systematic review of contexts, stakeholders, requirements, and challenges", in *Buildings*, vol. 15, issue 11, article 1825, pp. 1-22. [Online] Available at: doi.org/10.3390/buildings15111825 [Accessed 30 March 2026].

Mao, S. and Cao, W.-J. (2025), "Evaluating material passports for circularity in the construction industry", in *Sustainable Production and Consumption*, vol. 54, pp. 88-101. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.spc.2024.12.021 [Accessed 30 March 2026].

Markou, I., Sinnott, D. and Thomas, K. (2025), "Current methodologies of creating material passports – A systematic literature review", in *Case Studies in Construction Materials*, vol. 22, article e04267, pp. 1-24. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.cscm.2025.e04267 [Accessed 30 March 2026].

Mêda, P., Calvetti, D., Hjelseth, E. and Sousa, H. (2021), "Incremental digital twin conceptualisations targeting data-driven circular construction", in *Buildings*, vol. 11, issue 11, article 554, pp. 1-27. [Online] Available at: doi.org/10.3390/buildings11110554 [Accessed 30 March 2026].

Mêda, P., Fauth, J., Schranz, C., Sousa, H. and Urban, H. (2024a), "Twinning the path of digital building permits and digital building logbooks – Diagnosis and challenges", in *Developments in the Built Environment*, vol. 20, article 100573, pp. 1-16. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.dibe.2024.100573 [Accessed 30 March 2026].

Mêda, P., Calvetti, D., Sousa, H. and Moreira, J. (2024b), "Data discovery for digital building logbook (DBL) – Directly implementing and enabling a smarter urban built environment", in *Urban Science*, vol. 8, issue 4, article 160, pp. 1-24. [Online] Available at: doi.org/10.3390/urbansci8040160 [Accessed 30 March 2026].

Munaro, M. R. and Tavares, S. F. (2021), "Materials passport's review – Challenges and opportunities toward a circular economy building sector", in *Built Environment Project and Asset Management*, vol. 11, issue 4, pp. 767-782. [Online] Available at: doi.org/10.1108/BEPAM-02-2020-0027 [Accessed 30 March 2026].

Nadais, M., Cunha, R. P., Delgado, J. M. P. Q., Guimarães, A. S. and Pereira, P. F. (2026), "The concept of building renovation passports – A systematic review", in *Archives of Computational Methods in Engineering*. [Online] Available at: doi.org/10.1007/s11831-026-10528-4 [Accessed 30 March 2026].

Osello, A., Del Giudice, M., Donato, A. J. and Fratto, A. (2024), "Verso la Neutralità Climatica – Il ruolo chiave del Digital Twin nell'Industria 5.0 | Towards Climate Neutrality – The key role of the Digital Twin in Industry 5.0", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 15, pp. 276-285. [Online] Available at: doi.org/10.192 29/2464-9309/15222024 [Accessed 30 March 2026].

Paganin, G., Talamo, C., Atta, N. and Tinelli, E. (2024), "Riuso di componenti edilizi – Sistema di valutazione a supporto delle decisioni negli interventi di ridistribuzione interna | Reuse of building components – Assessment system to support decisions in indoor re-layout interventions", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 15, pp. 266-275. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/15212024 [Accessed 30 March 2026].

Palumbo, E., Mazzei, I., Perpetua, M. and Pomponi, F. (2025), "Impatti ambientali e sociali nel ciclo vita per una progettazione a basso carbonio | Environmental and social life cycle for low-carbon design", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 18, pp. 294-303. [Online] Available at: doi.org/10.69143/2464-9309/18172025 [Accessed 30 March 2026].

Ricci, L., Poli, I. and Marino, M. (2025), "Welfare urbano e rigenerazione – Sostenibilità e inclusione sociale per il raggiungimento degli SDG | Urban welfare and regeneration – Sustainability and social inclusion for achieving the SDGs", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 17, pp. 94-107. [Online] Available at: doi.org/10.69143/2464-9309/1752025 [Accessed 30 March 2026].

Rigillo, M., Galluccio, G. and Paragliola, F. (2023), "Digitale e circolarità in edilizia – Le KETs per la gestione degli scarti in UE | Digital and circularity in building – KETs for waste management in the European Union", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 13, pp. 247-258. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/13212023 [Accessed 30 March 2026].

Sanchez, B., Honic, M., Leite, F., Herthogs, P. and Stouffs, R. (2024), "Augmenting materials passports to support disassembly planning based on building information modelling standards", in *Journal of Building Engineering*, vol. 90, article 109083, pp. 1-18. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.jobe.2024.109083 [Accessed 30 March 2026].

Senarathne, H. N. Y., Weerasinghe, N. P. and Zhang, G. (2025), "Developing a standardized materials passport framework to unlock the full circular potential in the construction industry", in *Sustainability*, vol. 17, issue 14, article 6337, pp. 1-28. [Online] Available at: doi.org/10.3390/su17146337 [Accessed 30 March 2026].

Senarathne, H. N. Y., Weerasinghe, N. P., Parthiban, J., Hall, B., Harrison, J., Robert, D., Zhang, G. and Setunge, S. (2025), "Towards sustainable road pavement construction – A material passport framework", in *Buildings*, vol. 15, issue 16, article 2821, pp. 1-24. [Online] Available at: doi.org/10.3390/buildings15162821 [Accessed 30 March 2026].

Sesana, M. M. and Salvalai, G. (2018), "A review on Building Renovation Passport – Potentialities and barriers on current initiatives", in *Energy and Buildings*, vol. 173, pp. 195-205. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.05.027 [Accessed 30 March 2026].

Signorini, M., Dejaco, M. C. and Lupica Spagnolo, S. (2025), "The evolution of digital building logbook – Exploring building information gathering systems to boost building maintenance and renovation", in *Applied Sciences*, vol. 15, issue 2, article 771, pp. 1-19. [Online] Available at: doi.org/10.3390/app15020771 [Accessed 30 March 2026].

Talla, A. and McIlwaine, S. (2024), "Industry 4.0 and the circular economy – Using design-stage digital technology to reduce construction waste", in *Smart and Sustainable Built Environment*, vol. 13, issue 1, pp. 179-198. [Online] Available at: doi.org/10.1108/SASBE-03-2022-0050 [Accessed 30 April 2026].

Topraklı, A.Y. (2024), "Enabling circularity in Turkish construction – A case of BIM-based material management utilizing material passports", in *Smart and Sustainable Built Environment*, vol. ahead-of-print, issue ahead-of-print. [Online] Available at: doi.org/10.1108/SASBE-05-2024-0199 [Accessed 30 March 2026].

Ugliotti, F. M. and Stradiotto, E. (2025), "Integrating EPC data into openBIM workflows – A methodological approach for the digital building logbook", in *Sustainability*, vol. 17, issue 13, article 6005, pp. 1-26. [Online] Available at: doi.org/10.3390/su17136005 [Accessed 30 March 2026].

Urlainis, A., Giat, Y. and Mitelman, A. (2025), "Harnessing large language models for digital building logbook implementation", in *Buildings*, vol. 15, issue 18, article 3399, pp. 1-28. [Online] Available at: doi.org/10.3390/buildings15183399 [Accessed 30 March 2026].

Vahidi, A., Gebremariam, A. T., Di Maio, F., Meister, K., Koulaeian, T. and Rem, P. (2024), "RFID-based material passport system in a recycled concrete circular chain", in *Journal of Cleaner Production*, vol. 442, article 140973, pp. 1-11. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.140973 [Accessed 30 March 2026].

van Capelleveen, G., Vegter, D., Olthaar, M. and van Hillegersberg, J. (2023), "The anatomy of a passport for the circular economy – A conceptual definition, vision and structured literature review", in *Resources, Conservation & Recycling Advances*, vol. 17, article 200131, pp. 1-37. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.rcradv.2023.200131 [Accessed 30 March 2026].

Veliz Reyes, A., Olmez, D., Grout, J. and Carr, A. (2025), "Digital material passports in the AEC industry – A scoping review and conceptualisation of future research challenges", in *Architectural Engineering and Design Management*, latest articles, pp. 1-21. [Online] Available at: doi.org/10.1080/17452007.2025.2579731 [Accessed 30 March 2026].

Violano, A., Aenoai, R. G., Cervantes Puma, G. C. and Bragança, L. (2026), "The potential of material and product passports for the circular management of heritage buildings", in *Applied Sciences*, vol. 16, issue 2, article 865, pp. 1-21. [Online] Available at: doi.org/10.3390/app16020865 [Accessed 30 March 2026].

Wandiga, C. A. (2020), "Methodological review – Socio cultural analysis criteria for BIM modeling and material passport tracking of agriwaste as a building construction raw material", in *MRS Energy & Sustainability*, vol. 7, article 25, pp. 1-14. [Online] Available at: doi.org/10.1557/mre.2020.29 [Accessed 30 March 2026].

AGATHÓN – International Journal of Architecture, Art and Design | n. 19 | 2026 | pp. 310-331
ISSN print: 2464-9309 – ISSN online: 2532-683X | doi.org/10.69143/2464-9309/19182026

Article Info

Received 15 March 2026
Revised 06 April 2026
Accepted 07 April 2026
Published 30 June 2026

AESTHETIC DESIGN E FILOSOFIA PRATICA
Estetica ed etica nel progetto contemporaneo

AESTHETIC DESIGN AND PRACTICAL PHILOSOPHY
Aesthetics and ethics in contemporary design

Dario Russo

Abstract

L'articolo argomenta come nel design contemporaneo etica ed estetica coincidono nell'esperienza progettata, emergendo insieme dalla stessa logica progettuale, anziché costituire istanze separate chiamate a dialogare. Attraverso l'analisi critica della tradizione dell'estetizzazione diffusa e il confronto con l'Everyday Aesthetics il saggio introduce la distinzione tra iperestetica e ipoestetica, assumendo l'agevolazione come criterio progettuale e valutativo. Ne deriva una tesi che attraversa diverse scale e ambiti del progetto contemporaneo, dal design di prodotto ai servizi, dalle interfacce digitali agli spazi abitabili: il design configura relazioni, accessi e pratiche, rendendo visibile la responsabilità etica inscritta nella struttura stessa dell'esperienza. La tenuta della tesi è verificata attraverso casi paradigmatici scelti per la loro capacità di incarnare questa convergenza in contesti radicalmente diversi. Il quadro proposto riconosce i propri confini – la tesi privilegia la logica dell'agevolazione e della fluidità, lasciando aperte le questioni della co-responsabilità e del potere progettuale nei sistemi complessi – e indica in questi stessi confini le direzioni verso cui la ricerca dovrebbe proseguire.

This article argues that, in contemporary design, ethics and aesthetics coincide within designed experience, emerging together from the same design logic, rather than constituting separate domains brought into dialogue. Through a critical analysis of the tradition of diffuse aestheticisation and by engaging with Everyday Aesthetics, the essay introduces the distinction between hyper-aesthetics and hypo-aesthetics, taking facilitation as both a design and an evaluative criterion. This yields a thesis that cuts across different scales and fields of contemporary design, from product design to services and from digital interfaces to inhabitable spaces: design configures relations, access, and practices, thereby rendering visible the ethical responsibility inscribed within the very structure of experience. The robustness of this thesis is tested through a series of paradigmatic cases, selected for their capacity to embody this convergence in radically different contexts. The framework proposed here also recognises its own limits – it privileges the logic of facilitation and fluidity, while leaving open the questions of co-responsibility and design power within complex systems – and identifies, precisely within those limits, the directions in which further research should proceed.

Keywords

design, etica, estetica del quotidiano, esperienza, ipoestetica

design, ethics, everyday aesthetics, experience, hypo-aesthetics



Dario Russo, Architect and PhD, is an Associate Professor of Theory and History of Design at the University of Palermo (Italy), where he teaches in the Departments of Architecture and of Cultures and Society. His research interests include design history, communication design, service and interaction design, and the role of design in innovation, digital transformation, and artificial intelligence. E-mail: dario.russo18@unipa.it

Il design non occupa più uno spazio circoscritto tra le discipline del progetto. Esso agisce come infrastruttura diffusa dell'esperienza in quanto organizza ambienti, media interazioni, struttura interfacce, articola servizi, modella comportamenti individuali e collettivi e interviene sulle condizioni entro cui le cose vengono incontrate, comprese e utilizzate: in tal senso il design non produce soltanto artefatti, ma configura situazioni. Questa trasformazione modifica radicalmente il suo statuto teorico. Se il progetto interviene sulle condizioni dell'esperienza, allora esso agisce sulla forma del possibile, distribuendo accessi, orientando percorsi, facilitando alcune pratiche e rendendone altre meno probabili. Ogni configurazione progettuale stabilisce un certo modo di abitare uno spazio, di attraversare un ambiente, di relazionarsi a un dispositivo: ci si trova allora di fronte a una domanda preliminare, che vale la pena formulare con precisione: di quale tipo di sapere è espressione il progetto quando interviene a questo livello di profondità?

Il quadro culturale entro cui il design si muove è segnato da una crescente diffusione dell'estetico. Tradizionalmente inteso come riflessione sul bello – nella natura e nell'arte – il pensiero estetico ha visto progressivamente espandersi la propria area di pertinenza fino a investire oggetti d'uso, spazi pubblici, ambienti digitali e pratiche quotidiane.

In questo slittamento il design occupa una posizione singolare: a differenza dell'arte contemporanea, che ha deliberatamente abbandonato ogni obbligo verso la bellezza – fino a fare dell'anestetico, del perturbante o del volutamente brutto una propria risorsa espressiva – il design mantiene un legame strutturale con la piacevolezza percepita, con una forma di gradevolezza sensibile che sembra connaturata all'esperienza progettata, anche quando si allontana dalla bellezza nel senso classico del termine; è questa specificità estetica del design a richiedere strumenti concettuali propri. Quali esattamente?

A questa diffusione dell'estetico corrisponde, sul piano della pratica progettuale, una trasformazione altrettanto profonda. Per gran parte della sua storia moderna, il design ha avuto come referente principale l'oggetto fisico, un prodotto riproducibile in serie, con una forma, un peso e una superficie. A partire dalla seconda metà del Novecento, questo referente si è progressivamente eroso ed oggi si progettano servizi, flussi, interazioni e interfacce. La locuzione 'user experience' – diventata quasi un paradigma del design contemporaneo – segnala uno spostamento che investe la sostanza stessa del progetto: il suo baricentro si trasferisce dall'oggetto alla relazione che quell'oggetto, o quel sistema, o quel servizio rende possibile. Ciò che si chiede al progetto è di generare un'esperienza qualitativamente riuscita; cosa significhi esattamente questo e con quali strumenti si possa valutare è una domanda che la riflessione teorica sul design ha ancora davanti a sé.

A fianco di queste trasformazioni estetiche e pratiche il design è stato attraversato nel corso del Novecento da una domanda crescente di responsabilità: l'impatto ambientale della produzione industriale, le condizioni di lavoro nei sistemi manifatturieri globali, l'accessibilità degli artefatti per le fasce più vulnerabili della popolazione, la sostenibilità dei modelli di consumo sono temi che hanno progressivamente imposto al progetto una dimensione etica esplicita: al designer si chiede di rispondere delle conseguenze di ciò che progetta sul mondo. Questa consapevolezza ha generato orientamenti progettuali diversi – dal design per i bisogni reali al design sostenibile, dal design partecipativo al design dei servizi sociali – accomunati dall'idea che il progetto debba incorporare valori, oltre che funzioni. Ciò che però questa tradizione ha raramente messo in discussione è la struttura del rapporto tra etica ed estetica: se esse siano due istanze distinte chiamate a coesistere o se il loro legame sia più profondo e strutturale. È questa la domanda che orienta il presente lavoro con la tesi che etica ed estetica, nel progetto contemporaneo, convergano in modo immanente, emergendo insieme dalla stessa logica progettuale.

La tesi si sviluppa in cinque momenti: la ricostruzione delle dinamiche dell'estetizzazione diffusa, dallo Styling alle forme contemporanee di eccedenza simbolica; l'introduzione delle categorie dell'Everyday Aesthetics e della distinzione tra iperestetica e ipoestetica; la verifica di tali categorie nella pratica progettuale contemporanea, attraverso la nozione di agevolazione e una serie di casi paradigmatici; l'argomentazione della coincidenza immanente tra etica ed estetica nell'esperienza progettata; il riconoscimento dei limiti del quadro proposto e l'indicazione delle direzioni in cui la ricerca deve proseguire. Il contributo intende offrire alla comunità scientifica del design un quadro teorico unitario capace di leggere la dimensione etica del progetto come qualità costitutiva dell'esperienza che esso configura, immanente alla sua forma, anteriore a qualsiasi normativa esterna.

Styling e cosmesi del prodotto | L'estetizzazione, intesa come processo volto a conferire valore estetico ai prodotti, costituisce oggi una condizione diffusa e pervasiva. Di più: la merce è sistematicamente spettacolarizzata per ragioni commerciali. Questa attenzione – già esplicita nella produzione industriale della seconda metà dell'Ottocento, dalla Great Exhibition di Londra del 1851 ai Passages di Parigi (Benjamin, 2002), passando per piazze e boulevard tappezzati di 'affiches' che, secondo Grazioli (2001), arriva a configurare un 'museo della strada della pubblicità' (Fig. 1) – assume una specifica rilevanza progettuale nell'America degli anni Trenta, sotto la dizione di Styling. Il termine indica appunto la 'stilizzazione', in un frangente storico in cui le forme aerodinamiche, a siluro o a goccia, si affermano come tendenza perché incorporano simbolicamente la velocità che, dai Futuristi in poi, diventa sinonimo di modernità.

È in questo contesto che lo Styling manifesta la sua natura ambigua: da un lato strategia di valorizzazione commerciale, dall'altro riduzione del progetto a un'operazione prevalentemente formale. La critica più lucida viene proprio da Max Bill, fondatore della Scuola di Ulm. Già nel 1949, in Beauty from Function and as Function, Bill denuncia la deriva del design anglosassone: «Much of what these designers produce looks very attractive, and is superficially modern, but the design is often substandard, wantonly frivolous, with the fine facade concealing technical problems» (Bill, 2010a, p. 43). Quindici anni dopo, il giudizio si fa ancora più tagliente: la professione dei designer americani è ridotta a qualcosa di «[…] not unlike that of the hairdresser, in terms of both the services offered and their impact» (Bill, 2010b, p. 157); parrucchieri, mestieranti dediti ad abbellire ciò che resta sostanzialmente invariato, senza alcuna reale spinta verso l'innovazione. Un'attività di scarso valore progettuale che Gillo Dorfles (1972, p. 124) definisce 'cosmesi', codificando il termine in riferimento alla voce Styling come «[…] progettazione che si limita a una mera modificazione formale del prodotto senza nessuna altra ragione tecnica o scientifica, soltanto per accrescerne la 'piacevolezza' e aumentare le vendite». Non è casuale che il titolo della prima edizione di quel saggio sia Il Disegno Industriale e la sua Estetica: per Dorfles il nesso tra progetto ed estetica era il problema fondante della disciplina e lo Styling, riducendo l'estetica a superficie vendibile, ne rappresentava il tradimento.

A questa critica corrisponde, nel medesimo saggio, una definizione positiva del design volta a ribadirne il legame intrinseco con l'industria e a separarne nettamente l'ambito da quello dell'artigianato. Il design, secondo Dorfles (1972), implica tre condizioni fondamentali: l'uso non occasionale ma esclusivo della macchina, la conseguente iterazione seriale del prodotto e, ultimo ma non ultimo, la 'esteticità', intesa come intenzione esplicita del progettista di produrre bellezza[1]. Quest'ultima condizione non si sovrappone alla funzione né la sostituisce: ne è il compimento. A distanza di oltre mezzo secolo le prime due condizioni risultano profondamente trasformate: la macchina non costituisce più l'unico paradigma produttivo e la serialità convive con logiche di personalizzazione, ibridazione e produzione flessibile. Ciò che permane, e anzi si intensifica, è la dimensione estetica: non più uno degli elementi costitutivi del design, ma il suo baricentro.

Non sorprende allora che Raymond Loewy (1963) – parigino americanizzato – esponente dello Styling più universalmente noto, abbia intitolato un suo celebre saggio La Laideur se Vend Mal: letteralmente, la bruttezza si vende male; in sostanza, la bellezza paga (Fig. 2). Una massima la cui eco si prolunga ben oltre gli anni Trenta: quella che era nata come risposta congiunturale alla crisi economica del 1929 si trasforma progressivamente in una logica strutturale, fino a diventare la condizione ordinaria della produzione e del consumo contemporanei. La forma seduce, il simbolo vende, l'immagine prevale sulla sostanza[2]: è «[…] in questa fase – osserva Vanni Pasca (2010, p. 421) – che il rapporto tra ragioni tecniche, scientifiche, sociali ed elaborazione formale, in definitiva tra etica ed estetica, che fino allora aveva caratterizzato il design, costituendone il nucleo fondativo, inizia a incrinarsi».

Arte e design: indecidibilità ed eccedenza simbolica | Se negli anni Sessanta Dorfles poteva ancora tracciare una linea netta tra design e cosmesi, rivendicando l'esteticità come intenzione progettuale collegata alla funzione, a partire dal decennio successivo quella linea comincia a dissolversi. Si susseguono episodi nei quali la distinzione tra arte e design diventa sempre più difficile da sostenere. Non si tratta di arte nel senso tradizionale del termine, ma ci si riferisce piuttosto a oggetti ad alto tasso simbolico, capaci di intensificare l'esperienza percettiva e di generare quella concentrazione di senso che, nel sistema dell'arte, costituisce l'aura dell'opera, ciò che José Jiménez (2008) chiama 'retorica di accompagnamento' e che qui definiremo eccedenza simbolica: il surplus di significato che eccede la funzione pratica dell'oggetto e ne reclama uno status diverso, più ambiguo. Il terreno era stato preparato, nel corso degli anni Sessanta, da





Fig. 1 | Jules Chéret, Folies-Bergère – La Loïe Fuller (1893): colour lithograph, Imp. Chaix, Paris (credit: MoMA, New York, inv. 189.1968).

Fig. 2 | Raymond Loewy on the cover of Time, 31 October 1949; cover illustration by Boris Artzybasheff (credit: Time Magazine, 1949).

due movimenti che avevano già messo in discussione i fondamenti del progetto moderno. Il Pop Design aveva introdotto nell'oggetto d'uso il repertorio visivo della cultura di massa – fumetti, pubblicità e icone popolari – trasformando la merce in citazione ironica di se stessa. Il Radical Design, per parte sua, aveva radicalizzato la critica al funzionalismo fino a proporre oggetti volutamente inutilizzabili, concepiti come manifesti politici e culturali piuttosto che come prodotti[3]. In entrambi i casi la funzione cedeva il passo al messaggio: l'oggetto diventava veicolo di senso prima ancora che strumento d'uso.

Il circolo Alchymia (1976-1981) offre il primo esempio significativo di questa condizione. Il suo esito più noto, la Poltrona di Proust (1978) di Alessandro Mendini, è una poltrona dalle forme barocchegianti interamente ricoperta di macchie policrome: di fronte a questo oggetto il rimando è tanto alla pittura impressionista quanto alla letteratura di Marcel Proust, in un cortocircuito consapevole tra linguaggi e riferimenti culturali che eccede deliberatamente i confini del progetto (Fig. 3).

Sulla stessa linea, ma con una vocazione diversa, si colloca Memphis (1981-1986), gruppo fondato da Ettore Sottsass. A differenza di Alchymia, totalmente incentrata sulla dimensione sperimentale e critica del progetto, Memphis coltiva un'ambizione imprenditoriale: realizzare prototipi che, una volta verificate le potenzialità tecno-estetiche, possano essere prodotti in serie. Gli oggetti – prevalentemente arredi – sono carichi di riferimenti culturali, anche esotici, con piglio globale, cromatismi accesi e forme volutamente eccentriche, fino ad assumere una funzione più contemplativa che pratica. La libreria Carlton ne è l'esempio più eloquente: mobile-scultura dalla struttura asimmetrica e totemica, circola nella Storia del Design e sulle riviste di settore sempre e solo come immagine; mai con un libro sugli scaffali. Usarla significherebbe profanarla. Nelle sale d'asta raggiunge cifre comprese tra 10.000 e 30.000 euro: cifre che dicono tutto sul suo status simbolico ed economico (Fig. 4).

A distanza di qualche anno, e in un contesto culturale ormai profondamente mutato, questa stessa eccedenza simbolica riappare – con accenti diversi – nell'exploit del gruppo olandese Droog Design, che si afferma sulla scena internazionale a partire dal Salone del Mobile di Milano del 1993. I progetti Droog assumono sistematicamente la forma di metafore materializzate, in cui la componente concettuale prevale nettamente sul supporto materiale: oggetti che non descrivono il mondo ma lo interpretano, lo criticano, lo rovesciano.

Ne è un esempio eloquente la Rag Chair di Tejo Remy (1991): un arredo realizzato mediante la stratificazione di tessuti dismessi, compressi e tenuti insieme da cinghie. Che cos'è questo oggetto? Un prodotto d'uso? Senza dubbio, poiché accoglie il corpo di chi vi si adagia. Un'opera d'arte? Altrettanto certamente, poiché incorpora una critica sociale e una denuncia ambientale esplicita, puntando il dito contro l'industria della moda, responsabile della produzione massiva di rifiuti tessili (Figg. 5, 6). Inevitabile il paragone con la Venere degli Stracci (1967) di Michelangelo Pistoletto: arte povera e design concettuale si confrontano qui sullo stesso terreno simbolico (Fig. 7).

Alchymia, Memphis, Droog sono tre momenti di una stessa deriva, tre modi diversi di spingere l'oggetto oltre i propri confini disciplinari. È il processo che Maurizio Vitta (2011, p. 320) ricostruisce nel volume Il Progetto della Bellezza: nel gusto del design come creazione di puri prototipi si è potuta leggere «[…] l'implicita riaffermazione del principio artistico 'insufflato', ancora una volta, nell'oggetto d'uso. La bellezza è tornata a essere l'orizzonte delle cose».

Artidesign e Designart: quando il progetto eccede se stesso | Alla citata deriva la riflessione teorica ha risposto elaborando nuove categorie, due delle quali, Artidesign e Designart, meritano attenzione in quanto concetti con una propria genealogia e un proprio campo di applicazione, solo in parte sovrapponibili agli esempi fin qui descritti.

L'Artidesign prende forma da una riflessione di Filippo Alison e Renato De Fusco (2018), che individuano nel design italiano una qualità endogena del progetto: la capacità di sintesi tra arte, artigianato e design industriale, che combina le tecniche della produzione seriale con la finitura di pregio, la personalizzazione e un approccio artistico in termini di concept e ricerca. Si tratta di oggetti concepiti per durare, adattabili nel tempo, lontani dalla logica dell'usa-e-getta. Applicando questa categoria al contesto meridionale De Fusco e Rusciano (2015, p. 186) ne mettono in luce la dimensione storica: «[…] mentre l'oggetto artigianale, al pari dell'opera d'arte, è potenzialmente senza scadenza, anzi si valorizza col tempo, il prodotto industriale, al contrario, 'deve' scadere, consumarsi, per far posto a una nuova serie».

La Designart si manifesta lungo due traiettorie convergenti: la prima riguarda designer-artisti contemporanei i cui oggetti entrano deliberatamente nel circuito dell'arte attraverso gallerie e aste; la seconda riguarda oggetti storici che, a distanza di decenni, acquisiscono uno statuto iconico e un valore economico paragonabile a quello dell'opera d'arte, non per scelta progettuale, ma per consacrazione storica.

Alla prima traiettoria appartengono figure ibride come Ron Arad e Marc Newson. Arad incarna pienamente la figura dell'artista-designer: la sua sedia a dondolo Voido (Mag2006), prodotta da Magis, nasce dalla serie scultoria Oh Void e circola tanto nel mercato del design quanto in quello dell'arte[4] (Fig. 8). Newson, definito nel 2010 «[…] la figura più prominente del design contemporaneo» (Artprice, 2010, p. 48), porta alle estreme conseguenze questa logica con la Lockheed Lounge (1984), venduta in asta da Phillips de Pury & Company[5] a Londra nel 2009 per 1.105.250 dollari, cifra che segna emblematicamente l'ingresso del design nel circuito internazionale della valorizzazione simbolico-economica (Fig. 9). Un passaggio vantaggioso anche per le aziende, che «[…] mirano a presentarsi sui mercati internazionali con oggetti i cui alti prezzi ricevono legittimazione dal fatto che i designer delle aziende di furniture design sono in parte gli stessi presenti sui mercati della design art» (Pasca, 2010, p. 424).

Alla seconda traiettoria appartengono invece oggetti storici consacrati dalla patina del tempo. La poltrona Bibendum di Eileen Gray (1926-1928) ha raggiunto 687.500 dollari da Christie's[6] nel 2020 (Fig. 10); una teiera di Marianne Brandt del 1924 ha toccato stime comprese tra 300.000 e 500.000 dollari nella stessa sede[7] (Fig. 11): oggetti nati come prodotti industriali o prototipi artigianali che il mercato tratta ormai come opere d'arte.

Si tratta in entrambi i casi di oggetti che Elena Agudio (2013, p. 7) definisce 'bastardi': «Questi oggetti 'incestuosi', opere di artisti o designer che si sono spinti oltre i propri confini disciplinari, difficilmente classificabili secondo un'epistemologia schematica, sono stati creati per tradire le regole del gioco e infiltrarsi in contesti a loro non propri». Uno slittamento tra funzione, simbolo e valore di scambio che descrive una condizione diffusa del design contemporaneo, analizzato altrove, 'lumeggiando' Il Lato Oscuro del Design (Russo, 2013).

Ipermerce e crisi del progetto | La progressiva affermazione dell'estetica come baricentro del design – documentata negli episodi fin qui descritti – ha spinto diversi estetologi a interrogarsi sul ruolo dell'immagine e del simbolo nei processi di produzione e consumo contemporanei.

In particolare, Fulvio Carmagnola – riprendendo esplicitamente le tesi di Dorfles – ha rilanciato e approfondito il tema dell'estetizzazione diffusa, descrivendo una condizione culturale in cui la bellezza si intreccia strutturalmente con l'economia e i media. In questo quadro gli oggetti di design si configurano come 'simboli incarnati' (Carmagnola, 2006), forme materiali capaci di condensare e veicolare significati culturali. Carmagnola (2006) rilegge questa dimensione simbolica alla luce dell'immaginario, mostrando come il valore degli oggetti risieda nella capacità di attivare narrazioni, aspettative e desideri condivisi. Il simbolo incarnato diventa così 'simbolo immaginario': nodo in cui l'oggetto si inserisce in quella che l'autore definisce una 'fiction economy', un'economia fondata sulla produzione e sul consumo di immagini, racconti e valori simbolici.

Tutto ciò confluisce in modo esplicito nella riflessione sviluppata da Fulvio Carmagnola e Maurizio Ferraresi (1999, p. 7) sull'oggetto di consumo che viene interpretato come elemento propulsivo di una nuova forma di culto secolarizzato, una merce «[…] che funge da propellente al cult ipermerce […] i cult sono l'ipermerce, la merce più tipica del nostro tempo». L'ipermerce si configura dunque come un prodotto di consumo altamente desiderabile, merce elevata a un di più di se stessa, un'oltre-merce che eccede la propria funzione d'uso e il proprio status materiale per caricarsi di valori, aspettative e narrazioni capaci di suggestionare e orientare il desiderio.





Fig. 3 | Proust Armchair (1978), designed by Alessandro Mendini: polychrome armchair in inlaid wood and hand-painted fabric, limited edition (credit: Archivio Alessandro Mendini; photo by C. Lavatori).

Fig. 4 | Carlton (1981), designed by Ettore Sottsass: plastic laminate bookcase (credit: Memphis Milano).

In una direzione convergente Ernesto Francalanci (2006, p. 34) interpreta la storia degli oggetti come «[…] progressiva ipersignificazione che le merci hanno conquistato grazie all'inserimento al loro interno di una nuova qualità energetica, che ha saputo trasformarle in entità dotate di forte attrattività». Nella sua analisi l'estetica diffusa si estende dalla circolazione delle immagini e dalla valorizzazione simbolica delle merci fino alla struttura stessa dell'artefatto: «Una porta non è più soltanto una porta, e così una finestra, una sedia, un tavolo e tutti gli oggetti materiali che cadono sotto la nostra osservazione e il nostro uso» (Francalanci, 2006, p. 65).

Tale energia non è riconducibile alla funzione o alla tecnica, bensì alla capacità dell'oggetto di produrre attrazione, riconoscibilità e intensificazione dell'esperienza percettiva. L'ipermerce individuata da Carmagnola può essere letta, da questo punto di vista, come l'esito economico e culturale di tale processo: un oggetto la cui valorizzazione dipende dall'eccedenza simbolica e immaginaria che lo trasforma in dispositivo di desiderio.





Tuttavia, come osserva Andrea Mecacci (2012), questa sovrabbondanza simbolica, pur ampliando l'orizzonte dell'esperienza estetica, contribuisce a spostare progressivamente l'attenzione dall'uso alla rappresentazione: nel contesto dell'estetizzazione diffusa il progetto tende a risolversi in una forma di spettacolarizzazione, in cui 'il passaggio dalla progettazione dell'oggetto a quella del gusto' segna una trasformazione profonda dello statuto stesso del design, mentre il prodotto si configura come 'ipermerce, prodotto simbolico'. Il surplus estetico, portato alle sue conseguenze estreme, rischia di far scomparire l'uso nella pura apparenza di sé: l'oggetto cessa di essere tale per diventare immagine di se stesso. È di fronte a questa crisi che la riflessione estetica contemporanea ha cercato di riorientare lo sguardo verso ciò che lo spettacolo tende a rendere invisibile: la dimensione ordinaria, quotidiana e silenziosa dell'esperienza con le cose.

Estetico come qualità dell'esperienza | L'estetizzazione diffusa non si limita a descrivere la proliferazione di oggetti dotati di qualità formali accattivanti; essa segnala una trasformazione più radicale: lo spostamento dell'estetico dall'oggetto all'esperienza. Nel paradigma classico l'estetico si riferiva a oggetti determinati – opere d'arte o fenomeni naturali – e l'esperienza estetica assumeva il carattere dell'eccezionalità e della distanza contemplativa. La diagnosi della 'vaporizzazione' dell'arte formulata da Yves Michaud (2007) ha messo in luce una condizione in cui l'arte sembra dissolversi in una sorta di 'etere estetico'.[8]

Questa dispersione chiama in causa una ridefinizione più profonda del campo estetico, per la quale la tradizione pragmatista offre le coordinate teoriche più adeguate. Dewey (2007, pp. 269, 246) descrive l'esperienza estetica come «[…] la totale integrazione di ciò che la filosofia distingue come 'soggetto' e 'oggetto' (parlando in modo più diretto, organismo e ambiente) [ossia come qualcosa] in cui non esiste una distinzione tra sé e oggetto, poiché essa è estetica nella misura in cui organismo e ambiente cooperano per istituire un'esperienza ove entrambi sono così pienamente integrati che ciascuno di loro scompare». Laddove Michaud constata la disseminazione dell'arte nella vita Dewey ne offre il fondamento: l'estetico non abita gli oggetti, ma emerge nella qualità delle relazioni che l'esperienza istituisce.

È su questo sfondo teorico che nel terzo Millennio emerge la linea di ricerca denominata Everyday Aesthetics, intesa come subdisciplina dell'estetica filosofica volta a indagare i caratteri estetici dell'esperienza quotidiana (Saito, 2007; Di Stefano, 2017; Iannilli, 2019a, 2019b, 2020). Sottraendo l'estetico tanto al paradigma esclusivamente arte-centrico quanto alla ricerca dell'eccezionale, essa ne radica l'analisi nella continuità delle pratiche. Come osserva Iannilli (2019a, 2019b), è proprio in questo quadro che si apre la questione del design come luogo privilegiato in cui l'estetico si rende fruibile nella vita quotidiana.

Everyday Aesthetics e centralità delle pratiche | Se l'estetico si configura come qualità dell'esperienza, il quotidiano diventa il suo banco di prova

Figg. 5, 6 | Rag Chair (1991), designed by Tejo Remy: stacked and strapped recycled clothing (credit: Droog).

teorico. Gli autori che hanno contribuito a definire l'Everyday Aesthetics convergono su un punto fondamentale: l'esteticità non si manifesta nella contemplazione distaccata di oggetti eccezionali, ma nell'immersione nelle pratiche ordinarie.Yuriko Saito (2007) articola questa tesi nella sua forma più radicale. L'esperienza estetica quotidiana è 'action-oriented': si radica nelle scelte, nei comportamenti, nelle modalità con cui si abita un ambiente o si utilizzano oggetti e dispositivi, fino a includere gli aspetti apparentemente più automatici e insignificanti della vita ordinaria. L'estetico permea la trama continua delle pratiche, indipendentemente dalla straordinarietà dell'oggetto o della situazione. Il cosiddetto 'potere dell'estetica' indica precisamente questa capacità delle configurazioni sensibili di orientare concretamente la vita, incidendo sulla qualità dell'esistenza e sulle condizioni ambientali condivise.

Arto Haapala (2005) individua nella familiarità una categoria decisiva; l'esperienza estetica ordinaria coincide con un processo di 'home building': familiare è il luogo in cui tutto è sotto controllo e confortevole, in cui le cose appaiono dove dovrebbero essere. L'estetico si rivela nella coerenza relazionale che rende uno spazio abitabile: «Strangeness is an attack on our home building nature, our desire of familiarity» (Haapala, 2005, p. 46), condizione che il design può contribuire a istituire o a dissolvere. In questa prospettiva Jane Forsey (2014) propone di sostituire la nozione di significato con quella di funzione come categoria centrale dell'apprezzamento estetico. L'eccellenza funzionale diventa così una dimensione costitutiva dell'estetico: un oggetto d'uso si apprezza esteticamente nella misura in cui funziona, cioè si integra fluidamente nella pratica per cui è stato progettato.

Il tratto comune di queste posizioni è la centralità della relazione immersiva tra individuo e ambiente (Dewey ha fatto scuola). Il dispositivo ben progettato tende a integrarsi nella pratica fino a divenire quasi invisibile; la qualità estetica coincide con la fluidità d'uso e la coerenza dell'interazione. In questo quadro il design emerge come fenomeno paradigmatico dell'estetica del quotidiano, interviene direttamente sulle condizioni dell'esperienza, organizzando ambienti, oggetti e interfacce in modo da rendere le pratiche più coerenti e abitabili.

Il design funziona bene quando è protesico, tendendo a scomparire nell'esperienza che rende possibile. È proprio su questo terreno che si rende necessaria una distinzione ulteriore: tra forme di intensificazione che enfatizzano l'evidenza e forme di configurazione che privilegiano l'armonia. La categoria di ipoestetica permetterà di articolare questa differenza, chiarendo le implicazioni per il progetto contemporaneo.

Iperestetica e ipoestetica: la biforcazione dell'estetizzazione | L'estetizzazione contemporanea, come si è visto, tende ad assumere la forma di un'intensificazione simbolica permanente: l'estetico coincide con la messa in evidenza, con l'eccedenza, con la continua sollecitazione percettiva. Elisabetta Di Stefano (2017, p. 8) ha analizzato questo regime attraverso la nozione di iperestetica, intesa nel «[…] duplice senso suggerito dal prefisso greco 'hypér': 'al di sopra' ma anche 'oltre'»: un estetico che eccede i propri confini disciplinari e al tempo stesso si intensifica fino all'eccesso. Il paradosso di questo regime è che il bello riprodotto su scala industriale perde pregnanza, l'intensificazione permanente produce assuefazione, l'eccesso iconico si rovescia in anestetizzazione[9]: è il rischio già delineato in precedenza di un design ridotto a pura messa in scena del valore.

È a partire da questa diagnosi che Giovanni Matteucci (2016) introduce una distinzione teorica decisiva, articolando due livelli dell'esperienza estetica. Il primo – che possiamo chiamare iperestetico – opera attraverso l'ostentazione, l'intensificazione simbolica, la messa in evidenza; il secondo – l'ipoestetico – opera in modo per lo più tacito, contribuendo a strutturare quella che Matteucci chiama una 'forma di vita estetica'.

Per marcare la differenza Matteucci (2016) riserva il termine 'estetizzazione' al primo livello, riconoscendo nel secondo un'esteticità silenziosa che permea l'esperienza ordinaria senza esibirsi. Le trasformazioni che hanno investito il modello canonico dell'arte – dall'autorialità diffusa ai dispositivi esperienziali, dalla ricezione collettiva alla segnalazione non necessariamente professionale – hanno reso visibile il livello ipoestetico, sempre presente ma raramente tematizzato: esse indicano uno slittamento dall'opera-evento alla pratica condivisa e una riorganizzazione dell'estetico su base intersoggettiva e operativa.

L'ipoestetica designa precisamente questo versante dell'esperienza: quella configurazione relazionale che ci attrae perché esprime il nostro sentirci corrispondenti con l'ambiente circostante, l'armonia tacita che sostiene il fluire dell'esperienza ordinaria, al di là – anzi al di qua – dell'evidenza spettacolare e dell'effetto di sorpresa. In questa luce l'ipoestetico non è l'opposto dell'iperestetico, ma il suo presupposto: solo perché l'esperienza quotidiana possiede un'intrinseca potenzialità estetica, questa può essere intensificata, amplificata o spettacolarizzata. L'iperestetico amplifica un potenziale che l'ipoestetico custodisce.[10]

Dalla biforcazione estetica al design | La distinzione tra iperestetica e ipoestetica non riguarda soltanto modalità differenti dell'esperienza sensibile; essa investe direttamente il destino del progetto contemporaneo. Nel regime iperestetico il progetto tende a privilegiare l'evidenza formale, la riconoscibilità immediata e la capacità di attrazione; l'oggetto o l'ambiente aspirano a distinguersi e a imporsi come evento, producendo valore attraverso la spettacolarizzazione.

Nella prospettiva ipoestetica il progetto si orienta invece verso una logica diversa: l'estetico opera come struttura tacita dell'interazione, come principio di integrazione che modella il rapporto tra soggetto e ambiente. Le linee dell'Everyday Aesthetics convergono qui con la riflessione di Matteucci: il dispositivo ben progettato si incorpora nell'azione (Saito, 2007), la familiarità diventa qualità estetica (Haapala, 2005) e la funzione si rivela una dimensione costitutiva dell'apprezzamento (Forsey, 2014).

Il baricentro si sposta così dalla rappresentazione alla configurazione delle pratiche: ciò che conta non è l'effetto prodotto, ma l'insieme di relazioni che l'oggetto o il dispositivo rendono possibili. Il progetto contemporaneo si trova di fronte a questa biforcazione: intensificare l'esperienza, alimentando dinamiche di visibilità e distinzione, oppure configurare ambienti e dispositivi in cui la qualità estetica coincide con la fluidità d'uso e la coerenza relazionale dell'interazione.

Su questo terreno il design emerge come campo privilegiato di verifica dell'ipoestetica. Se l'estetico coincide con una qualità relazionale dell'esperienza, il progetto si definisce come configurazione di condizioni di corrispondenza tra soggetti, ambienti e forme di vita. È su questo piano che la sezione che segue condurrà l'analisi: non più sul versante delle categorie estetiche, ma su quello delle pratiche progettuali che quelle categorie incarnano e mettono alla prova (Iannilli, 2019b).

Design come esperienzialità intenzionale | Nell'introduzione a L'Estetico e il Quotidiano, Iannilli (2019a, p. 12) dichiara subito il suo proposito: chiarire come «[…] uno degli scopi principali del design sia quello di rendere l'estetico fruibile nel quotidiano», traducendolo in esperienza d'uso. L'estetico non è così una qualità attribuita a oggetti singolari, ma prende forma nella relazione tra soggetto, artefatto e contesto; in questa relazione interviene il design per configurarne le condizioni e orientarne lo svolgimento.

Se l'estetico «[…] è divenuto una qualità dell'esperienza stessa»[11] (Michaud, 2007, p. 10), il design ne rappresenta la configurazione intenzionale. L'attenzione si sposta dall'oggetto considerato isolatamente alla situazione in cui opera: al modo in cui viene incontrato, compreso e utilizzato. Su questo versante si colloca la proposta di Daniel Martin Feige (2018, p. 110) che intende il funzionamento degli oggetti di design come categoria estetica autonoma: non l'indugio contemplativo sulle qualità sensibili delle cose, bensì le «[…] forme pratiche [Praxisformen] dell'estetico», incorporate nei processi di interazione e irriducibili a un significato determinato. Ciò che il progetto determina è la struttura dell'interazione; l'estetico emerge quando tale struttura consente una corrispondenza tra le possibilità offerte dal dispositivo e le attese di chi lo utilizza. La qualità estetica si manifesta nella continuità tra percezione e uso, nella relazione proporzionata tra intenzione e risposta.

Agevolazione come criterio progettuale | La tradizione estetica moderna ha riconosciuto all'esperienza artistica la capacità di includere il disarmonico, il disgustoso, persino l'aporetico come valori positivi: dalla teoria kantiana (1790) del sublime – che già Burke (1757) aveva fondato su un atteggiamento spettatoriale al riparo da ogni coinvolgimento diretto – fino alle elaborazioni contemporanee sull'estetica del disgusto e del disarmonico (Feloj, 2017; Tedeschini, 2018). L'esperienza progettata obbedisce a una logica diversa; il quotidiano è l'ambito in cui il coinvolgimento diretto non viene mai meno: la gratificazione estetica che esso veicola è generata da relazioni di carattere armonico, «[…] proprio perché incaricate di favorire, o addirittura di agevolare, l'operatività intrinseca alla dimensione delle pratiche» (Iannilli, 2019a, p. 47).

Nel design la qualità estetica si misura nella riuscita dell'interazione: l'agevolazione – intesa come relazione fluida tra percezione e azione – ne costituisce il criterio distintivo. Un sistema progettato in modo adeguato rende leggibili le proprie possibilità d'uso e consente di attivarle in modo continuativo. La gratificazione non deriva da uno scarto spettacolare, bensì dalla coerenza operativa che sostiene la pratica: l'estetico quotidiano si manifesta quando il fruitore 'si sente dentro' l'azione senza avvertire il dispositivo come ostacolo.

Se il corretto funzionamento di un progetto può essere considerato criterio estetico (Feige, 2018), e se il quid estetico nel quotidiano dipende dal grado di agevolazione del dispositivo – piuttosto che da un'aura che rende iper-significante un oggetto – alcune implicazioni del design odierno diventano più leggibili. Primo: «[…] la 'funzione estetica' deve essere integrata con la 'funzione d'uso', o anzi fatta proprio da quest'ultima» (Iannilli, 2019a, p. 237): ciò che piace è ciò che consente di fare, e ciò che consente di fare bene acquista valore estetico. Secondo: la riduzione dell'attrito – eliminazione del superfluo, ottimizzazione dei passaggi, fluidità dell'accesso – costituisce un obiettivo strutturale del progetto. Terzo: là dove il design funziona, il dispositivo si incorpora nella pratica fino a diventare quasi trasparente. In breve il design migliore è quello protesico che scompare nella funzione, con gratificazione estetica.

Sul versante dell'agevolazione si situa uno degli esempi più eloquenti del design italiano del Novecento: lo sgabello Sella di Achille e Pier Giacomo Castiglioni (1957). Nei corridoi angusti delle abitazioni milanesi degli anni Cinquanta, dove il telefono era collocato a parete, uno sgabello a base stabile avrebbe costituito un ostacolo: un urto distratto, magari con una valigia o i pacchi della spesa, ne avrebbe determinato la caduta. La base emisferica basculante di Sella risolve questo problema alla radice: l'oggetto assorbe l'urto senza cadere, si adatta al movimento, si appoggia alla parete. E consente una postura sospesa – in piedi e seduto allo stesso tempo – proporzionata all'uso del telefono in uno spazio ridotto: «[…] quando uso un telefono pubblico – riflette Achille Castiglioni – mi piace spostarmi, ma vorrei anche sedermi, anche se non completamente» (Castiglioni, cit. in Antonelli and Guarnaccia, 2000, p. 101; Figg. 12, 13).[12]

La gratificazione nasce dalla misura tra corpo, spazio e funzione: l'estetico coincide con la regolazione dell'interazione. Sella non è un caso isolato: il design italiano ha lavorato a lungo sulla qualità relazionale dell'uso, ben prima che la locuzione 'user experience' entrasse nel lessico progettuale[13]. Quella che altrove si impone come trasformazione strutturale a partire dagli anni Ottanta – con la convergenza tra tecnologia informatica e neuroscienze e l'emergere della coppia desiderio / tecnologia come nuovo asse del progetto – in Italia aveva già trovato espressione in una tradizione progettuale attenta all'esperienza vissuta. Proprio in quegli anni Flusser (2003) individuava nella smaterializzazione, nell'interattività e nel piacere i tratti destinati a ridefinire strutturalmente il design.

Marras e Mecacci (2015) hanno ricostruito questa traiettoria come successione di grandi polarità: dalla dialettica ottocentesca bello / utile alla coppia modernista forma/funzione, fino alla sostituzione novecentesca con consumo / immagine, e infine alla coppia desiderio / tecnologia che, con l'avvento della New Economy e la diffusione dell'Human Computer Interaction (HCI), ridefinisce le priorità progettuali: dalla 'usability' alla 'user experience', in cui gli aspetti emotivi ed estetici diventano centrali. Il passaggio dall'oggetto all'interazione si consolida così come categoria primaria del progetto contemporaneo.

Experience Design, interfaccia e spazio relazionale | Se la New Economy e la diffusione capillare dell'HCI segnano il passaggio dalla 'usability' alla 'user experience', l'Experience Design compie il passo decisivo. Nell'User Experience Design il termine 'user' implica ancora che una mediazione sia necessaria: su questo mediatore si catalizza l'attenzione tanto nel progetto quanto nell'uso. Nell'Experience Design invece l'utente è già responsabilizzato: è diventato componente di un processo a cui partecipa in quanto abile nel rispondere a specifici stimoli.

«L'eliminazione del termine 'user' nell'etichetta sembra suggerire che la responsabilità sia ora tutta nelle mani del design. È compito della progettazione far sì che una specifica esperienza possa essere realizzata nel modo più efficiente e gratificante possibile» (Iannilli, 2019a, p. 252), senza che alcun mediatore si imponga come ostacolo. Il designer non configura un'esperienza per un utente, ma dispone le condizioni di un'esperienza in cui soggetto e dispositivo sono in relazione, paradigma che Iannilli (2020) ha analizzato sistematicamente in The Aesthetics of Experience Design – A Philosophical Essay.

In questo quadro la nozione di interfaccia acquisisce valore generale. È Bonsiepe (1995, p. 20) a fornirne la definizione strutturale di riferimento: «[...] l'interfaccia non è un oggetto, ma uno spazio in cui si articola l'interazione tra corpo umano, utensile (artefatto, inteso sia come artefatto oggettuale sia come artefatto comunicativo) e scopo dell'azione. Proprio questa è la sfera di pertinenza irrinunciabile del disegno industriale e grafico».

Nella sua concezione più elementare – osserva Iannilli (2019a, pp. 263-264) – essa «[…] consiste in un'articolazione visibile di simboli e funzioni che permette lo svolgimento di un'azione. Tale articolazione è di fatto un'articolazione di salienze […] basata sulle apparenze, sull'interattività e sul principio dell'essere letteralmente 'a portata di mano' (si pensi, banalmente, alle superfici touchscreen con cui si interagisce quotidianamente)». Tuttavia, la nozione si estende ben oltre lo schermo; interfacce sono anche capi di abbigliamento, stili di vita, edifici, ambienti quotidiani: ovunque soggetti e oggetti entrano in relazione strutturata.

Questa logica relazionale opera anche all'interno dell'interfaccia digitale. Frost (2016) propone di pensarla come un sistema vivente in cui atomi – un pulsante, un campo di testo, un'icona – si combinano in molecole, le molecole in organismi, fino a formare pagine intere. Come i mattoncini LEGO, che da soli non dicono nulla, ma assemblati generano ambienti abitabili, ogni elemento acquista senso solo nella rete di relazioni in cui è inserito. L'interfaccia, tuttavia, non si limita a organizzare: agisce, orienta, persuade.

Stock, Guerini e Zancaro (2018, p. 195) ricordano che il suo progetto mira «[…] to induce the user, or the audience in general, to perform certain actions in the real world». Considerando il contesto sociale, sfruttando l'ambiente situazionale e valorizzando gli aspetti emotivi della comunicazione, l'interfaccia diventa strumento insieme di gratificazione e di persuasione: ogni oggetto diventa un nodo di una rete esperienziale[14]. Tre progetti, selezionati per la loro capacità di incarnare in contesti radicalmente diversi la convergenza tra qualità estetica e responsabilità progettuale, consentono di verificare la tenuta della tesi. Il primo è la app IO, piattaforma digitale che unifica l'accesso ai servizi della Pubblica Amministrazione, un caso emblematico dello spostamento del baricentro progettuale dal rapporto forma / funzione all'interazione digitale; il Compasso d'Oro assegnato nel 2022 lo rende uno dei rari esempi in cui questo spostamento ha ricevuto un riconoscimento disciplinare esplicito, sancendo la piena dignità del Service Design digitale come pratica progettuale autonoma.

Il progetto prende forma come infrastruttura relazionale: pagamenti, notifiche, identità digitale e comunicazioni istituzionali confluiscono in un ambiente unitario che ricompone la frammentazione di portali e procedure in un percorso continuo e orientabile. L'esperienza del cittadino viene riorganizzata in una sequenza coerente di accessi, in cui l'interazione con l'Istituzione acquisisce leggibilità e praticabilità. L'estetico emerge nella qualità della mediazione tra il sistema pubblico e l'utente, nella fluidità dell'interazione e nella riduzione dell'attrito burocratico. Restano tuttavia limiti strutturali che circoscrivono la portata dell'agevolazione: l'accesso presuppone la disponibilità di un dispositivo, di una connessione e di competenze digitali minime, escludendo chi ne è privo; l'esperienza è configurata entro i confini fissati dall'istituzione, senza che il cittadino abbia voce nella sua progettazione; l'infrastruttura dipende da piattaforme proprietarie, introducendo un'asimmetria di sovranità in un servizio pubblico (Prosperetti, 2026; Fig. 14).

Il secondo caso sposta la logica dall'infrastruttura digitale allo spazio fisico. La caffetteria contemporanea è un fenomeno diffuso e anonimo, trasversale alle metropoli di tutto il mondo: un progetto senza autore unico, verificabile nell'esperienza quotidiana di chiunque, e per questo paradigmatico in senso diverso dagli altri casi, non perché eccellente, ma perché ordinario. Nella sua configurazione più elaborata, è uno spazio estetico commerciale che sintetizza molteplici dimensioni relazionali: il 'sentirsi a casa' tipico dello spazio privato (Haapala, 2005), la dimensione intersoggettiva e multisensoriale dello spazio pubblico, la proiezione globale dello spazio virtuale. La sua progettazione – architettonica, d'interni, sonora e olfattiva – mira a configurare un'esperienza abitabile: si lavora, ci si rilassa, si socializza, si osservano tendenze e si consumano oggetti e stili di vita.

L'agevolazione opera a scala ambientale: l'utente è immerso in un sistema di relazioni progettate che orienta pratiche, gusti e comportamenti. La gratificazione estetica coincide con il sentirsi intonati all'ambiente, con la fluidità con cui ci si muove in uno spazio che sembra fatto su misura e che Iannilli (2019a) ha analizzato come luogo paradigmatico in cui l'estetico quotidiano si fa esperienza progettata. Questo caso tuttavia mette in luce un limite che la tesi deve riconoscere: la stessa logica dell'agevolazione e della gratificazione estetica che rende la caffetteria un'esperienza fluida e abitabile può operare tanto a favore di una socialità autentica quanto a servizio di dinamiche consumistiche: lo spazio è progettato per far stare bene, ma anche per far consumare, e le due cose sono spesso indistinguibili nell'esperienza vissuta. La coincidenza estetico-etica è qui pienamente operante, ma orientata da interessi che il progetto non esplicita e che l'esperienza non consente di vedere; a ciò si aggiunge la tendenza all'omologazione globale: le grandi catene replicano lo stesso modello relazionale in contesti molto diversi, ottenendo fluidità a prezzo dell'indistinzione (Fig. 15).

Il terzo caso mostra come la medesima logica possa investire direttamente il corpo. SuperPower-



Fig. 7 | Venere degli Stracci (1967), designed by Michelangelo Pistoletto: cement, enamel and rags (credit: Galleria Continua, San Gimignano).

Me, sviluppato presso il Santa Chiara Fab Lab dell'Università di Siena da un gruppo transdisciplinare di designer, ortodontisti, ingegneri e sviluppatori, è il caso più recente e metodologicamente più rigoroso tra quelli esaminati: un progetto in cui la dimensione etica non è aggiunta al progetto, ma ne costituisce la ragione originaria. Prende avvio da un problema clinico preciso: i bambini affetti da malocclusione di classe III devono indossare una maschera ortodontica per almeno quattordici ore al giorno, per un periodo che può superare i nove mesi. Le maschere tradizionali, ingombranti e visivamente penalizzanti, generano resistenza e scarsa adesione alla terapia.

Il progetto interviene ripensando l'intera esperienza terapeutica: la maschera viene ridisegnata in resina biocompatibile e personalizzata sull'anatomia del bambino; un sistema di sensori registra in tempo reale le ore di utilizzo e trasmette i dati al medico; un videogioco integra tali dati in una dinamica di progressione narrativa, assegnando risorse e potenziamenti proporzionalmente alla costanza nella terapia. L'obbligo clinico viene così assorbito in una struttura motivazionale che mobilita l'immaginazione e il gioco. La compenetrazione tra le dimensioni fisica e digitale si fa qui tangibile: il dispositivo si inserisce in una rete informativa che connette paziente, famiglia e professionista sanitario, trasformando l'atto terapeutico in un'esperienza monitorata, condivisa e valorizzata.

La gratificazione si radica nell'efficacia clinica e si consolida nella qualità del percorso che sostiene l'adesione nel tempo (Marti et alii, 2021). L'estetico coincide con la configurazione di questa architettura relazionale, in cui corpo, tecnologia e narrazione convergono in un'unica esperienza progettata. Il limite di questo caso è tuttavia inscritto nella sua stessa specificità: il progetto nasce in un contesto clinico controllato, con risorse e competenze transdisciplinari difficilmente replicabili su scala più ampia. La coincidenza estetico-etica è qui nitida proprio perché le condizioni che la rendono possibile sono eccezionali (Fig. 16).

In ciascuno di questi progetti il design agisce come configurazione di condizioni relazionali. L'estetico si manifesta nella qualità di tale organizzazione, nella misura in cui l'esperienza si offre come coerente, orientabile e praticabile. Strutturare un ambiente implica tuttavia una scelta: ogni interfaccia dispone di accessi, gerarchizza le possibilità e rende alcune traiettorie più evidenti di altre. L'ordine dell'esperienza è sempre risultato di una precisa architettura progettuale e, come tale, porta in sé scelte e orientamenti.

La stessa logica opera in contesti anche molto distanti da quelli esaminati: Olivastri e Tagliasco (2024) analizzano la progettazione dei Centri del Riuso e del Riparo come touchpoint di reti di servizi per l'economia circolare, mostrando come anche lì lo spazio fisico sia al tempo stesso un'infrastruttura relazionale e un dispositivo etico. Nella pratica del service design orientato alla sostenibilità, etica ed estetica chiamano entrambe in causa un sistema di valori (Findeli, 1994) e la loro convergenza è immanente alla forma del progetto, anteriore a qualsiasi dichiarazione d'intenti: affiora la dimensione etica del design, inscritta nella forma stessa delle relazioni che esso rende possibili.

Design come atto etico: dalla configurazione estetica all'implicazione etica | Se il design configura condizioni relazionali – strutturando ambienti, organizzando interfacce, distribuendo accessi – ogni scelta progettuale implica già una presa di posizione: su chi è facilitato e chi è escluso, su quali pratiche vengono rese fluide e quali osteggiate, su quale forma di coesistenza si rende praticabile. La dimensione etica è iscritta nella struttura stessa dell'esperienza che il progetto rende possibile, prima ancora che nelle intenzioni di chi progetta. L'estetico, come si è mostrato, opera come qualità relazionale dell'esperienza, principio strutturale tacito che sostiene l'armonia operativa tra soggetto e ambiente. Su questo stesso terreno si radica la dimensione etica, immanente alla forma dell'esperienza progettata. Lo spostamento teorico che si propone è preciso: dall'etica come criterio esterno al progetto all'etica come effetto interno della sua configurazione.

Etica e design tra responsabilità e cura | Il Novecento ha elaborato risposte diverse al problema del rapporto tra etica e design, ma tutte condividono un presupposto implicito che vale la pena rendere esplicito: l'etica è concepita come istanza esterna al progetto, come principio che lo orienta, lo corregge o lo vincola dall'esterno. Ricostruire le principali declinazioni di questo presupposto significa anche chiarire perché, pur avvicinandosi progressivamente alla dimensione relazionale dell'esperienza, nessuna di esse compia il passo verso la coincidenza che questo paragrafo intende argomentare. Victor Papanek (1972) inaugura il dibattito con una posizione radicale. Nell'apertura di Design for the Real World non esita a descrivere il design industriale come una delle professioni più nocive della modernità: complice della produzione di oggetti inutili, pericolosi e concepiti per un mercato che esclude sistematicamente i più vulnerabili: i poveri, i disabili, le popolazioni dei paesi in via di sviluppo, largamente assimilabili a quello che oggi prende il nome di 'Sud Globale'. La denuncia è diretta: il design ha messo la propria competenza al servizio del consumo irresponsabile, trasformando l'innovazione in strumento di profitto e l'estetica in seduzione commerciale.[15]

A questa diagnosi Papanek contrappone una pratica progettuale orientata ai bisogni reali: radio a basso costo per comunità remote, dispositivi terapeutici accessibili, ambienti di gioco per bambini con disabilità sviluppati con i propri studenti e distribuiti gratuitamente. L'etica assume la forma di una critica militante e di una responsabilità personale dichiarata: il progettista deve scegliere da che parte stare. Il rapporto tra etica ed estetica è quello di una gerarchia esplicita – la prima disciplina e orienta la seconda – e l'implicazione etica del progetto dipende interamente dall'intenzione di chi progetta.



Fig. 8 | Oh Void II (2002), designed by Ron Arad: carbon fibre and epoxy resin rocking chair (credit: Contemporary Art Society).

Tomás Maldonado allarga la prospettiva dalla responsabilità individuale a quella sistemica. Nella definizione presentata all'ICSID di Venezia nel 1961 e sviluppata in Disegno Industriale – Un Riesame (1976), progettare la forma di un prodotto non significa intervenire sulla sua apparenza estetica, ma coordinare, integrare e articolare tutti i fattori che partecipano al processo costitutivo della forma stessa: funzionali, simbolici, culturali, tecnico-economici e tecnico-produttivi. In questa prospettiva la forma è sempre il risultato di una pluralità di determinazioni – tra cui, implicitamente, anche quelle etiche – e non può essere ricondotta a 'un'idea aprioristica di valore estetico o estetico-funzionale' elaborata al di fuori del processo costruttivo (Maldonado, 2008).

Da questa concezione della forma emerge la nozione più ampia e impegnativa di disegno industriale come 'fenomeno sociale totale': «[…] vale a dire che esso appartiene a quella categoria di fenomeni che non si possono esaminare isolatamente, ma sempre in relazione ad altri fenomeni con cui costituiscono un unico tessuto connettivo» (Maldonado, 2008, p. 15).

Il design è dunque chiamato a confrontarsi con le conseguenze ambientali e sociali del sistema tecnico-produttivo nel suo complesso, con la distribuzione delle priorità tra fattori simbolici ed economici, con il modo in cui produzione e consumo si esplicano in una data società. Così l'etica assume la forma di una consapevolezza critica del ruolo strutturale che il progetto riveste nella società industriale; consapevolezza che anticipa lucidamente la questione ecologica. Anche in questo caso però essa opera come orizzonte di riferimento esterno: definisce le condizioni di legittimità del progetto senza abitarne la forma.

Con Ezio Manzini (2015) il centro di gravità si sposta dalla responsabilità alla partecipazione. In Design, When Everybody Designs il punto di partenza è una condizione già osservata da Vanni Pasca (2010, p. 422): viviamo in una «[...] 'società progettante', nel senso che [...] ognuno deve progettare tutto, dalle proprie vacanze al proprio lavoro alla propria vita, oltre al mondo che lo circonda». In questo orizzonte, il designer esperto non può più concepirsi come unico protagonista del processo: il suo ruolo diventa quello di mediatore tra interessi diversi e facilitatore delle idee e delle iniziative degli altri attori coinvolti.

Manzini (2015) distingue però questa figura da ciò che chiama 'post-it design': una riduzione burocratica del ruolo del designer a semplice raccoglitore di opinioni. I designer esperti portano «[…] creativity and culture (i.e., their ability to conceive large scenarios and/or original design proposals) and the possibility of using them to trigger the social conversation and to feed it with new ideas» (Manzini, 2015, p. 49). L'etica assume così la forma di responsabilità verso la comunità e di orientamento all'innovazione sociale: un impegno a rendere possibili forme di vita più sostenibili, ancorato all'intenzione dell'esperto e al suo ruolo nel processo co-progettuale. Nelle Politiche del Quotidiano Ezio Manzini (2018) porta lo stesso sguardo sulla concretezza della vita quotidiana, mettendo l'accento su ciò che ciascuno può fare, da solo o insieme agli altri, a partire da dove si trova. Due temi di questo testo sono particolarmente rilevanti: la collaborazione e la cura. La collaborazione diventa la struttura stessa delle politiche del quotidiano, prima ancora che il metodo del processo co-progettuale: «[...] una sequenza di azioni che influenzano i sistemi sociotecnici [...] in cui si opera e con cui si entra in relazione: delle azioni sul mondo, attinenti la vita di tutti i giorni, fatte operando da dove si è» (Manzini, 2018, p. 114). La cura è il tono di questa collaborazione: «[...] ci troviamo nel mezzo di qualcosa la cui esistenza è tanto preziosa quanto fragile. E che pertanto occorre averne cura. Una cura che deve essere messa in atto da tutti gli interessati» (Manzini, 2018, p. 17). Cura, insomma, come orientamento condiviso verso ciò che vale la pena preservare e costruire insieme[16]. L'etica si fa qui pratica collettiva e quotidiana, ma resta un orientamento che precede il progetto, senza ancora coincidere con la sua struttura interna. È in questa dimensione che il pensiero di Manzini tocca la soglia dell'estetica della vita quotidiana, il terreno su cui si muove Saito.

Yuriko Saito (2017, 2022) sviluppa questa prospettiva nella sua dimensione più specificamente etica: in Aesthetics of the Familiar e in Aesthetics of Care mostra come l'esperienza estetica quotidiana possieda una forza pratica – il 'power of the aesthetic' – capace di orientare comportamenti, modellare ambienti e contribuire a un 'better world-making'. La cura verso gli oggetti, gli spazi e le relazioni che ci circondano è inseparabile dalla qualità estetica dell'esperienza: prendersi cura di qualcosa significa percepirlo con attenzione, cogliere le linee di tendenza che innervano un contesto, orientare l'azione nella loro direzione e farsene carico nel corso stesso dell'esperienza (Iannilli, 2019a). L'estetico acquisisce così una valenza etica immanente alle pratiche quotidiane, avvicinandosi alla soglia della coincidenza senza ancora varcarla.[17]

La proposta più sofisticata viene da Luciano Floridi (2019, p. 26) che, in The Logic of Information, definisce la filosofia come design concettuale, vale a dire «[...] the art of identifying and clarifying open questions and of devising, refining, proposing, and evaluating explanatory answers». Il pensiero filosofico configura attivamente il mondo, producendo modelli e orientando possibilità. Filosofia e design, dunque, condividono una struttura fondamentale: entrambi sono pratiche di configurazione del reale; e l'etica sembra finalmente convergere con il progetto su un piano comune[18]. Tuttavia anche in Floridi essa resta una disciplina 'normativa': definisce criteri e stabilisce orientamenti senza abitare la forma del progetto. Persino la proposta più radicale di integrazione tra filosofia e progetto si ferma sulla soglia della coincidenza. La tesi qui proposta compie quel passo ulteriore.

Etica ed estetica nell'esperienza progettata | Nell'Aesthetic Design, etica ed estetica non dialogano: coincidono nell'esperienza progettata. Questa convergenza diventa evidente quando si considerano operazioni progettuali apparentemente neutrali: agevolare un'interazione significa già selezionare quali utenti, quale velocità, quale tipo di accesso; semplificare un'interfaccia significa gerar-

chizzare: qualcosa avanza, qualcosa recede, qualcosa sparisce; rendere fluido un percorso significa distribuire le possibilità in modo asimmetrico. L'etico coincide con questa distribuzione del possibile: immanenza relazionale inscritta nella forma stessa dell'esperienza, irriducibile a sovrastruttura normativa.

Si pensi a due casi già discussi. Il progetto SuperPowerMe rende accessibile e positivamente connotata un'esperienza terapeutica, intervenendo sulla forma dell'apparecchio ortodontico e, al contempo, sul campo affettivo in cui quell'esperienza viene vissuta. La progettazione del coffee shop contemporaneo organizza una forma di socialità, un ritmo, un'idea di comunità temporanea ben oltre l'erogazione di una bevanda. Quelle stesse linee di tendenza che la cura coglie nell'esperienza quotidiana diventano oggetto di codificazione progettuale: intrecciare cura e spazio estetico commerciale significa, come osserva Iannilli (2019b), individuare dinamiche emergenti e farsi carico, attraverso processi adattativi, di pratiche non ancora codificate. In entrambi i casi l'etico abita il progetto dall'interno: è la forma stessa dell'esperienza che il progetto produce.

Questa coincidenza è già operante in ogni progetto nel momento in cui esso sceglie cosa agevolare e cosa ostacolare, cosa rendere visibile e cosa far sparire, quale tipo di relazione rendere possibile e quale rendere difficile. Il design non può non essere etico, esattamente come non può non essere estetico: entrambe le dimensioni sono immanenti alla struttura stessa dell'esperienza progettata. Riconoscerlo significa comprendere la responsabilità costitutiva del design come qualcosa di inscritto nella sua pratica, non sovrimposto dall'esterno. Se Floridi (2019) ha proposto di leggere la filosofia come design concettuale, il percorso inverso è altrettanto fecondo: il design può essere letto come 'filosofia pratica', che realizza, nella configurazione concreta dell'esperienza, quella coincidenza tra forma e valore che nessun quadro normativo esterno potrebbe né garantire né sostituire.

Discussione e conclusioni | La tesi argomentata in queste pagine ha seguito una traiettoria precisa: dal primato estetico che ha condotto il progetto verso la spettacolarizzazione dell'oggetto, attraverso la riscoperta del quotidiano come luogo privilegiato dell'esperienza estetica, fino alla tesi secondo cui, nel design contemporaneo, etica ed estetica coincidono nell'esperienza progettata. Il baricentro si è spostato dalla rappresentazione alla configurazione delle pratiche: ciò che conta, più che l'effetto prodotto sull'osservatore, è l'insieme di relazioni che l'oggetto, il dispositivo o l'ambiente rendono possibili.

Questa tesi si regge su una distinzione che ha funzionato da cerniera dell'intera argomentazione: quella tra iperestetica e ipoestetica. Al regime dell'intensificazione e della spettacolarizzazione si contrappone una qualità estetica che opera in modo tacito, strutturando il rapporto tra soggetto e ambiente senza esibirsi. La categoria di corrispondenza – mutuata da Matteucci (2016) e assunta qui come categoria progettuale – descrive questo secondo registro: la qualità relazionale di un'esperienza che riesce perché soggetto, artefatto e contesto sono in accordo operativo.

Il design che funziona meglio è dunque una protesi che scompare. Lo sgabello Sella, la app IO e SuperPowerMe mostrano la stessa logica in contesti radicalmente diversi: agevolazione dell'interazione, riduzione delle barriere, qualità estetica come riuscita dell'esperienza. L'etico è immanente a questa configurazione: ogni scelta progettuale distribuisce gli accessi, orienta le pratiche, rende alcune forme di vita più praticabili di altre. È un effetto strutturale della forma del progetto, che precede la normativa esterna. Etica ed estetica abitano entrambe, costitutivamente, la struttura dell'esperienza che il design configura. Questa tesi ha tuttavia limiti che meritano di essere riconosciuti con precisione.

Il primo riguarda il campo di applicazione. Il quadro teorico sviluppato nelle pagine precedenti – fondato sull'Everyday Aesthetics, sulla logica dell'agevolazione e sulla categoria dell'ipoestetica – privilegia una specifica logica del progetto: quella della continuità, dell'armonia operativa e della fluidità d'uso. Resta fuori, almeno in parte, una tradizione progettuale altrettanto rilevante: quella che lavora precisamente sull'interruzione della fluidità, producendo shock estetici come strumento di riflessione.

Un esempio eloquente proviene ancora dai Droog: la Do Hit Chair (2000) di Marijn van der Poll consegna all'acquirente un cubo d'acciaio e una mazza. La 'sedia' non esiste ancora: deve essere conquistata a colpi di martello. Qui il progetto impone un gesto, una scelta, una responsabilità: agevolare sarebbe tradire l'intenzione (Fig. 17). Lo shock estetico che l'Experience Design esclude strutturalmente è qui il mezzo principale e l'intenzione è critica: rovesciare la passività del consumatore che riceve oggetti 'già fatti'. Le due logiche – configurare l'esperienza o renderla problematica – rispondono a intenzionalità radicalmente diverse e appartengono a registri del progetto che la distinzione iper e ipoestetica, nella formulazione proposta, non riesce ancora a contenere pienamente. Riconoscere questo confine rafforza la tesi, delimitandola: una tesi consapevole dei propri limiti è più solida.

Il secondo limite riguarda il rischio che un'etica immanente scivoli in un'etica automatica. Sostenere che l'etico è inscritto nella struttura di ogni esperienza progettata consente di concludere che ogni progetto è, per definizione, eticamente orientato, per il solo fatto di esistere. La tesi richiede qui una distinzione che il quadro proposto lascia aperta: tra immanenza come struttura costitutiva (il design ha sempre, inevitabilmente, una dimensione etica) e immanenza come garanzia (quella dimensione orientata al bene). Avere sempre una dimensione etica è cosa diversa dall'essere automaticamente virtuosi: la corresponsabilità tra progettista, committenza e contesto culturale rimane una variabile che nessuna coincidenza strutturale tra etica ed estetica può sostituire (Zannoni et alii, 2024).

Il terzo limite riguarda la questione del potere. La tesi mostra che decidere cosa agevolare e cosa ostacolare, cosa rendere visibile e cosa far arretrare ha sempre una valenza etica. Resta però aperta la domanda su chi detiene il potere di progettare e in base a quali interessi quella decisione viene presa. La Solar Bottle (2006) di Alberto Meda e Francisco Gomez Paz – un contenitore in PET trasparente per depurare acqua contaminata tramite energia solare, progetto eticamente ed esteticamente riuscito – è rimasta un prototipo: nessun produttore l'ha adottata su scala industriale (Fig. 18).

La coincidenza etico-estetica nell'esperienza progettata presuppone che il progetto esista e sia fruibile; quando le logiche di mercato bloccano questa traduzione la tesi incontra un limite che essa stessa non può superare. L'immanenza estetico-etica può diventare, in determinate condizioni, uno strumento di legittimazione di scelte che rispondono a logiche di controllo o di esclusione. Quando si passa a sistemi di scala maggiore – dalla app IO agli algoritmi di raccomandazione, alle architetture urbane, alle infrastrutture digitali di massa – la stessa logica non regge senza un'analisi delle asimmetrie che strutturano chi progetta, per chi e con quali conseguenze.

Sul piano della diffusione il quadro teorico proposto incontra barriere di natura diversa. Sul versante culturale, la tendenza dominante nel design contemporaneo privilegia ancora la visibilità e la spettacolarizzazione: logiche iperestetiche che rendono difficile il riconoscimento istituzionale e commerciale delle pratiche ipoestetiche. Sul versante economico la coincidenza estetico-etica richiede processi progettuali più complessi e tempi più lunghi, spesso incompatibili con le logiche di mercato che premiano la rapidità e la scalabilità.

Sul versante tecnologico la progettazione di oggetti e sistemi intelligenti introduce nuove criticità: la sostenibilità dell'esperienza d'uso deve confrontarsi con l'impatto ambientale delle componenti digitali e con le asimmetrie tra chi beneficia delle tecnologie e chi ne subisce i costi nascosti. Sul versante organizzativo la responsabilità del progettista si estende ben oltre la fase esecutiva, investendo l'intera catena del valore; ma questa responsabilità tende a essere trattata come effetto indiretto del processo piuttosto che come suo fattore fondante (Zannoni et alii, 2024).

La tesi mantiene tuttavia una significativa trasferibilità. Regge con maggiore solidità nei contesti in cui il progetto è circoscritto, l'intenzionalità è riconoscibile e il rapporto tra progettista e fruitore è diretto, come nel design del prodotto, nel service design a scala ridotta, nel design terapeutico e nella progettazione di interfacce digitali. Regge anche quando i principi dell'agevolazione vengono integrati fin dalle fasi metaprogettuali, come condizione strutturale e non come correzione finale: Arquilla e Caruso (2025) mostrano, nel contesto dell'inclusione, che incorporare criteri etici sin dall'inizio del processo produce risultati più solidi e trasferibili rispetto a qualsiasi intervento correttivo successivo.

La tesi si indebolisce invece nei sistemi complessi, in cui l'esperienza è il risultato di una pluralità di decisioni distribuite e non coordinate e in cui le asimmetrie di potere rendono difficile attribuire la configurazione dell'esperienza a una scelta progettuale identificabile. Il dialogo con altri settori disciplinari – dall'architettura alla pianificazione urbana, dall'interaction design alle politiche pubbliche – rimane aperto e costituisce uno degli orizzonti più fecondi per sviluppi futuri.

Questi limiti tracciano il perimetro della tesi e disegnano le direzioni in cui il lavoro teorico deve proseguire: verso una categoria progettuale capace di integrare anche le logiche di interruzione e shock estetico che il quadro proposto non riesce ancora a contenere; verso un'analisi più articolata della corresponsabilità tra progettista, committenza e contesto culturale; verso gli strumenti necessari a leggere la coincidenza estetico-etica nei sistemi di scala maggiore, dove le asimmetrie del potere progettuale richiedono un'attenzione che questo saggio ha solo potuto evocare. L'Aesthetic Design si configura come una prospettiva aperta e radicata

nel contingente, che consente di leggere il progetto contemporaneo in tutta la sua densità etica e sensibile, sapendo che tale densità richiede ogni volta una verifica circostanziata.

Il contributo si colloca all'intersezione di alcune delle sfide più urgenti dell'Agenda 2030 (UN, 2015). Il legame tra la qualità estetica dell'esperienza progettata e il benessere del fruitore richiama direttamente l'SDG 3, come il caso di SuperPowerMe mostra con particolare evidenza, trasformando un obbligo terapeutico in un'esperienza positivamente vissuta. La tesi secondo cui ogni progetto configura un'infrastruttura relazionale dialoga con l'SDG 9, che riconosce nell'innovazione e nelle infrastrutture un asse strategico per uno sviluppo equo e sostenibile: progettare bene significa progettare infrastrutture di accesso, oltre che prestazionali.

L'SDG 10, sulla riduzione delle disuguaglianze, è forse il più direttamente connesso alla tesi: la questione di chi viene agevolato e chi escluso, di quali pratiche vengono rese fluide e quali osteggiate, è la stessa che attraversa ogni scelta progettuale; ed è esattamente la domanda che la coincidenza estetico-etica pone al centro dell'Aesthetic Design. L'SDG 12 sul consumo e la produzione responsabili interroga infine direttamente la logica iperestetica che ha dominato il design del Novecento: quando la forma seduce e il simbolo vende, la responsabilità progettuale nei confronti dei modelli di consumo cui si contribuisce a produrre è una dimensione immanente al progetto, inscritta nella sua stessa forma. Riconoscere questa immanenza non risolve le tensioni tra questi obiettivi – la coincidenza estetico-etica può operare anche a servizio di logiche consumistiche, come nel caso della caffetteria mostra – e tuttavia fornisce uno strumento per leggerle con maggiore precisione e per orientare il progetto in modo più consapevole. La corrispondenza designa una qualità dell'esperienza che il progetto può costruire o distruggere e che richiede di essere giudicata nel concreto delle relazioni che produce.

Design no longer occupies a circumscribed place among the project-based disciplines. It now acts as a diffuse infrastructure of experience, insofar as it organises environments, mediates interactions, structures interfaces, articulates services, shapes individual and collective behaviours, and intervenes in the conditions under which things are encountered, understood, and used. In this sense, design does not merely produce artefacts: it configures situations. This transformation radically alters its theoretical status. If design intervenes in the conditions of experience, then it acts upon the very form of the possible, distributing access, directing pathways, facilitating certain practices, and rendering others less likely. Every design configuration establishes a particular way of inhabiting a space, moving through an environment, and relating to a device. A preliminary question therefore arises, one worth formulating with precision: what kind of knowledge does design embody when it intervenes at this level of depth?

The cultural framework within which design now operates is marked by the growing diffusion of the aesthetic. Traditionally understood as reflection on beauty – in nature and in art – aesthetic thought has progressively expanded its sphere of relevance, to the point of encompassing everyday objects, public spaces, digital environments, and quotidian practices. Within this shift, design occupies a singular position: unlike contemporary art, which has deliberately abandoned any obligation towards beauty, to the point of making the anaesthetic, the unsettling, or the deliberately ugly into an expressive resource of its own, design retains a structural link with perceived pleasantness, with a form of sensory appeal that appears intrinsic to designed experience, even when it departs from beauty in the classical sense of the term. It is precisely this aesthetic specificity of design that calls for conceptual tools of its own. Which ones, exactly?

Corresponding to this diffusion of the aesthetic, on the plane of design practice, is an equally profound transformation. For much of its modern history, design took the physical object as its principal referent: a product reproducible in series, with a form, a weight, and a surface. From the second half of the twentieth century onwards, that referent was progressively eroded. Today, one designs services, flows, interactions, and interfaces. The expression 'user experience' – which has become almost a paradigm of contemporary design – signals a shift that affects the very substance of the project: its centre of gravity moves from the object to the relation that that object, or system, or service makes possible. What is now required of design is that it generate a qualitatively successful experience. What this means precisely, and how it may be assessed, is a question that design studies have yet to resolve fully.

Alongside these aesthetic and practical transformations, design has also been traversed throughout the twentieth century by a growing call for accountability: the environmental impact of industrial production, labour conditions within global manufacturing systems, the accessibility of artefacts for the most vulnerable sections of the population, and the sustainability of models of consumption have all progressively imposed an explicit ethical dimension upon design. Designers are now called upon to answer for the consequences of what they design upon the world.

This awareness has generated a range of design orientations – from design for real needs to sustainable design, from participatory design to social service design – united by the idea that design must incorporate values and not merely functions. What this tradition has only rarely called into question, however, is the structure of the relationship between ethics and aesthetics: whether they are two distinct instances required to coexist, or whether their bond is deeper and more structural. This is the question that guides the present essay, advancing the thesis that, in contemporary design, ethics and aesthetics converge immanently, emerging together from the same design logic. The thesis unfolds in five stages: the reconstruction of the dynamics of diffuse aestheticisation, from Styling to contemporary forms of symbolic excess; the introduction of the categories of Everyday Aesthetics and of the distinction between hyper-aesthetics and hypo-aesthetics; the testing of these categories within contemporary design practice through the notion of facilitation and a series of paradigmatic cases; the argument for the immanent coincidence of ethics and aesthetics within designed experience; and, finally, the recognition of the limits of the proposed framework, together with an indication of the directions in which research ought to proceed. The aim of this contribution is to offer the design research community a unified theoretical framework capable of reading the ethical dimension of design as a constitutive quality of the experience it configures, immanent to its form, and prior to any external normativity.

Styling and the cosmetic treatment of the product | Aestheticisation, understood as the process through which products are endowed with aesthetic value, has now become a widespread and pervasive condition. More than that, commodities are systematically spectacularised for commercial ends. This attention – already clearly visible in the industrial production of the second half of the nineteenth century, from the Great Exhibition in London in 1851 to the Paris Arcades (Benjamin, 2002), and through squares and boulevards covered with affiches, which, according to Grazioli (2001), effectively turned the street into a kind of museum of advertising (Fig. 1) – acquired a specifically design-related relevance in 1930s America under the heading of Styling. The term refers, in effect, to stylisation, at a historical moment in which aerodynamic, torpedo-like, and teardrop forms emerged as a dominant tendency because they symbolically embodied speed, which, from the Futurists onwards, had become synonymous with modernity.

It is within this context that Styling reveals its ambiguity: on the one hand, it functions as a strategy of commercial enhancement; on the other, it reduces design to a predominantly formal operation. The most lucid criticism came from Max Bill, founder of the Ulm School. As early as 1949, in Beauty from Function and as Function, Bill (2010a, p. 43) denounced the drift of Anglo-Saxon design: «Much of what these designers produce looks very attractive, and is superficially modern, but the design is often substandard, wantonly frivolous, with the fine facade concealing technical problems». Fifteen years later, his judgement had become even sharper: the profession of the American designer was reduced to something «[…] not unlike that of the hairdresser, in terms of both the services offered and their impact» (Bill, 2010b, p. 157); that is, to practitioners concerned merely with embellishing what remains fundamentally unchanged, without any genuine drive towards innovation.

Dorfles (1972) described this low-value design activity as 'cosmesi', using the term in connection with Styling to indicate a form of design restricted to mere formal alteration of the product, unsupported by any technical or scientific rationale, and aimed solely at increasing its pleasantness and boosting sales. It is no accident that the first edition of that essay bore the title Il Disegno Industriale e la sua Estetica: for Dorfles, the relation between design and aesthetics was the founding problem of the discipline, and Styling, by reducing aesthetics to a marketable surface, already represented a betrayal of that relation.

Corresponding to this criticism, in the same essay, is a positive definition of design intended to reaffirm its intrinsic bond with industry, and sharply distinguish its domain from that of craft. According to Dorfles (1972), design entails three fundamental conditions: the not occasional but exclusive use of the machine, the resulting serial repetition of the product, and, finally, 'estheticity', understood as the designer's explicit intention to produce beauty[1]. This final condition neither overlaps with function



Fig. 9 | Lockheed Lounge (1986), designed by Marc Newson: riveted aluminium and fibreglass chaise longue (credits: Marc Newson Ltd).

nor replaces it: rather, it brings it to completion. More than half a century later, the first two conditions have been profoundly transformed: the machine no longer constitutes the sole productive paradigm, and seriality now coexists with logics of personalisation, hybridisation, and flexible production. What has remained, and indeed intensified, is the aesthetic dimension: no longer one constitutive component of design, but its centre of gravity.

It is therefore hardly surprising that Raymond Loewy (1963) – the Paris-born designer who became one of the best-known exponents of Styling in America – entitled one of his most famous books La Laideur se Vend Mal: literally, ugliness does not sell well; in more practical terms, beauty pays (Fig. 2). The resonance of this maxim extends far beyond the 1930s: what began as a contingent response to the economic crisis of 1929 gradually became a structural logic, eventually turning into the ordinary condition of contemporary production and consumption. Form seduces, symbol sells, and image prevails over substance[2]. It is precisely in this phase, as Vanni Pasca (2010) observes, that the relation between technical, scientific, and social reasons, and formal elaboration – ultimately, between ethics and aesthetics – which had hitherto characterised design and constituted its founding core, begins to fracture.

Art and design: undecidability and symbolic excess | If, in the 1960s, Dorfles could still draw a clear line between design and cosmetic treatment, claiming aesthetic intentionality as a design intention linked to function, from the following decade onwards that line began to dissolve. A series of episodes followed in which the distinction between art and design became increasingly difficult to uphold. This is not art in the traditional sense of the term; rather, it refers to objects with a high symbolic charge, capable of intensifying perceptual experience and generating that concentration of meaning which, within the art system, constitutes the aura of the work – what José Jiménez (2008) calls 'attendant rhetoric', and what will here be defined as symbolic excess: a surplus of meaning that exceeds the practical function of the object, and lays claim to a different, more ambiguous status.

The ground had already been prepared, during the 1960s, by two movements that had begun to call the foundations of modern design into question. Pop Design introduced into everyday objects the visual repertoire of mass culture – comics, advertising, and popular icons – turning the commodity into an ironic quotation of itself. Radical Design, for its part, pushed the critique of functionalism to the point of proposing deliberately unusable objects, conceived as political and cultural manifestos rather than as products[3]. In both cases, function gave way to message: the object became a vehicle of meaning even before it served as an instrument of use.

The Alchymia circle (1976-1981) offers the first significant example of this condition. Its best-known outcome, Alessandro Mendini's Poltrona di Proust (1978), is an armchair with baroque-inflected forms, entirely covered in polychrome dabs of colour. Faced with this object, one is prompted to think simultaneously of Impressionist painting and of Marcel Proust's literature, in a self-conscious short circuit of languages and cultural references that deliberately exceeds the boundaries of design (Fig. 3).

Along similar lines, though with a different vocation, stands Memphis (1981-1986), the group founded by Ettore Sottsass. Unlike Alchymia, which was wholly focused on the experimental and critical dimension of design, Memphis cultivated an entrepreneurial ambition: to develop prototypes which, once their techno-aesthetic potential had been verified, might be serially produced. These objects – predominantly pieces of furniture – are laden with cultural references, including exotic ones, and marked by a global attitude, vivid chromatic schemes, and deliberately eccentric forms, to the point of assuming a more contemplative than practical function. The Carlton bookcase is its most eloquent example: a sculpture-furniture hybrid with an asymmetrical, totemic structure, it circulates in design history and specialist magazines only as an image, never with books on its shelves. To use it would be to profane it. In auction rooms, it fetches between 10,000 and 30,000 euros: figures that say everything about its symbolic and economic status (Fig. 4).

A few years later and within a cultural context that had by then profoundly changed, this same symbolic excess reappeared – though with different inflections – in the breakthrough of the Dutch group Droog Design, which established itself on the international scene from the 1993 Salone del Mobile in Milan onwards. Droog projects systematically take the form of materialised metaphors, in which the conceptual component clearly prevails over the material support: objects that do not describe the world, but interpret it, criticise it, and overturn it.

A particularly eloquent example is Tejo Remy's Rag Chair (1991): a furnishing object made by layering discarded textiles, compressed and held together by straps. What is this object? A functional product? Certainly, since it receives the body of the person who sits or reclines in it. A work of art? Equally certainly, since it incorporates a social critique and an explicit environmental indictment, pointing the finger at the fashion industry, which is responsible for the mass production of textile waste (Figg. 5, 6). The comparison with Michelangelo Pistoletto's Venere degli Stracci (1967) is unavoidable: 'arte povera' and conceptual design confront one another here on the same symbolic terrain (Fig. 7).

Alchymia, Memphis, and Droog are three moments within the same drift, three different ways of pushing the object beyond its disciplinary boundaries. It is the process reconstructed by Maurizio Vitta (2011) in the book entitled Il Progetto della Bellezza: within the taste for design as the creation of pure prototypes, one may discern the implicit reassertion of the artistic principle once again breathed into the everyday object. Beauty, in other words, has returned to being the horizon of things.

Artidesign and Designart: when design exceeds itself | In response to the drift outlined above, theoretical reflection has developed new categories, two of which – Artidesign and Designart – deserve particular attention, insofar as they are concepts



Fig. 10 | Bibendum Chair (1926-1928), designed by Eileen Gray: leather and chrome-plated steel (source: christies.com).

with their own genealogy and field of application, only partly overlapping with the examples discussed so far.

Artidesign emerges from a reflection by Filippo Alison and Renato De Fusco (2018), who identify within Italian design an endogenous quality of the project: the capacity to synthesise art, craft, and industrial design, combining the techniques of serial production with fine finishing, customisation, and an artistic approach in terms of concept and research. These are objects conceived to endure, adaptable over time, and far removed from the logic of disposability. Applying this category to the Southern Italian context, De Fusco and Rusciano (2015) bring out its historical dimension: while the crafted object, like the work of art, is potentially timeless and indeed gains value over time, the industrial product, by contrast, is destined to expire and wear out, so as to make room for a new series.

Designart takes shape along two converging trajectories: the first concerns contemporary designer-artists whose objects deliberately enter the art circuit through galleries and auction houses; the second concerns historical objects which, decades later, acquire an iconic status and an economic value comparable to that of the work of art, not by design choice, but through historical consecration.

Hybrid figures such as Ron Arad and Marc Newson belong to the first trajectory. Arad fully embodies the figure of the artist-designer: his rocking chair Voido (2006), produced by Magis, stems from the sculptural series Oh Void, and circulates in both the design market and the art market[4] (Fig. 8). Newson, described in 2010 as the most prominent figure in contemporary design (Artprice, 2010), pushes this logic to its furthest consequences with Lockheed Lounge (1984), sold at auction by Phillips de Pury & Company[5] in London in 2009 for 1,105,250 dollars, a figure that emblematically marks the entry of design into the international circuit of symbolic and economic valorisation (Fig. 9). This transition is also advantageous for firms, which aim to present themselves on international markets with objects whose high prices are legitimised by the fact that the designers working for furniture design companies are, in part, the same figures active within the design art market (Pasca, 2010).

The second trajectory, by contrast, includes historical objects consecrated by the patina of time. Eileen Gray's Bibendum Chair (1926-1928) reached 687,500 dollars at Christie's[6] in 2020 (Fig. 10); a 1924 teapot by Marianne Brandt achieved estimates between 300,000 and 500,000 dollars at the same auction house[7] (Fig. 11). These are objects originally conceived as industrial products or craft prototypes which the market now treats as works of art.

In both cases, then, we are dealing with undecidable objects, which Elena Agudio (2013) defines as 'bastard' objects: objects of a hybrid and transgressive kind, created by artists or designers who have pushed beyond their own disciplinary boundaries, and which resist classification within any schematic epistemology. They are objects made to betray the rules of the game and insinuate themselves into contexts not originally their own. This slippage between function, symbol, and exchange value describes a widespread condition of contemporary design, explored elsewhere in the book Il Lato Oscuro del Design (Russo, 2013).

Hyper-commodity and the crisis of design | The progressive rise of aesthetics as the centre of gravity of design – as documented in the episodes discussed so far – has led several aestheticians to reflect on the role of image and symbol within contemporary processes of production and consumption. Fulvio Carmagnola, in particular – explicitly taking up Dorfles's theses – has revived and deepened the theme of diffuse aestheticisation, describing a cultural condition in which beauty is structurally intertwined with the economy and the media. Within this framework, design objects take shape as 'embodied symbols' (Carmagnola, 2006), material forms capable of condensing and conveying cultural meanings. Carmagnola (2006) rereads this symbolic dimension in the light of the imaginary, showing how the value of objects lies in their capacity to activate shared narratives, expectations, and desires. The embodied symbol thus becomes an 'imaginary symbol': a node at which the object inserts itself into what the author defines as a 'fiction economy', that is, an economy founded upon the production and consumption of images, narratives, and symbolic values.

All this feeds directly into the reflection developed by Fulvio Carmagnola and Maurizio Ferraresi (1999) on the consumer object, interpreted as the driving element of a new form of secularised cult: a commodity that acts as the propellant of cult hyper-commodity, since cult objects are hyper-commodities, the commodity most typical of our time. Hyper-commodity thus takes shape as a highly desirable consumer product, a commodity raised to something more than itself, a meta-commodity that exceeds both its use function and its material status in order to become charged with values, expectations, and narratives capable of suggesting and directing desire.

Moving in a convergent direction, Ernesto Francalanci (2006) interprets the history of objects as a process of progressive hyper-signification, which commodities have achieved by introducing within them a new energetic quality that has transformed them into entities endowed with strong attractiveness. In his account, diffuse aesthetics extends from the circulation of images and the symbolic valorisation of commodities to the very structure of the artefact itself: a door is no longer simply a door, and the same applies to a window, a chair, a table, and all the material objects that fall within our observation and our use (Francalanci, 2006).

Such energy cannot be reduced either to function or to technique; rather, it lies in the object's capacity to generate attraction, recognisability, and an intensification of perceptual experience. From this point of view, the hyper-commodity identified by Carmagnola may be read as the economic and cultural outcome of such a process: an object whose valorisation depends on the symbolic and imaginary excess that transforms it into a device of desire.

As Andrea Mecacci (2012) observes, however, this symbolic overabundance, while broadening the horizon of aesthetic experience, progressively shifts attention from use to representation. Within the context of diffuse aestheticisation, design tends to resolve itself into a form of spectacularisation, in which the shift from designing the object to designing taste marks a profound transformation in the

very status of design, while the product takes shape as hyper-commodity and symbolic product. Taken to its extreme consequences, aesthetic surplus risks causing use to disappear into its own sheer appearance: the object ceases to be an object and becomes the image of itself. It is in response to this crisis that contemporary aesthetic reflection has sought to redirect attention towards what spectacle tends to render invisible: the ordinary, everyday, and silent dimension of experience with things.

The aesthetic as a quality of experience | Diffuse aestheticisation does not merely describe the proliferation of objects endowed with appealing formal qualities; it points to a more radical transformation: the displacement of the aesthetic from the object to experience. Within the classical paradigm, the aesthetic referred to specific objects – works of art, or natural phenomena – and aesthetic experience assumed the character of exceptionality and contemplative distance. Yves Michaud's diagnosis of the 'vaporisation' of art brought to light a condition in which art appears to dissolve into a kind of 'aesthetic ether' (Michaud, 2007).[8]

This dispersal calls for a deeper redefinition of the aesthetic field, for which the pragmatist tradition offers the most appropriate theoretical coordinates. Dewey (2007) describes aesthetic experience as the complete interpenetration of self and the world of objects and events, and more specifically as a condition in which there is no distinction between self and object, because experience is aesthetic insofar as organism and environment cooperate in instituting an experience in which both are so fully integrated that each disappears. Where Michaud registers the dissemination of art throughout life, Dewey provides its foundation: the aesthetic does not reside in objects but emerges in the quality of the relations that experience establishes.

It is against this theoretical background that, in the third millennium, the line of research known as Everyday Aesthetics has emerged, understood as a subdiscipline of philosophical aesthetics concerned with investigating the aesthetic character of everyday experience (Saito, 2007; Di Stefano, 2017; Iannilli, 2019a, 2019b, 2020). By removing the aesthetic from both an exclusively art-centred paradigm and the pursuit of the exceptional, it grounds its analysis in the continuity of practices. As Iannilli (2019a, 2019b) observes, it is precisely within this framework that the question of design opens up as the privileged site in which the aesthetic becomes available in everyday life.

Everyday Aesthetics and the centrality of practices | If the aesthetic takes shape as a quality of experience, then everyday life becomes its decisive theoretical testing ground. The authors who have contributed to defining Everyday Aesthetics converge on one fundamental point: aestheticity does not manifest itself in the detached contemplation of exceptional objects, but in immersion within ordinary practices.

Yuriko Saito (2007) articulates this thesis in its most radical form. Everyday aesthetic experience is 'action-oriented': it is rooted in choices, behaviours, and in the ways one inhabits an environment or makes use of objects and devices, extending even to the apparently most automatic and insignificant aspects of ordinary life. The aesthetic permeates the continuous texture of practices, regardless of the extraordinariness of the object or the situation. The so-called 'power of the aesthetic' refers precisely to this capacity of sensible configurations to orient life in concrete terms, affecting the quality of existence and the shared conditions of the environment.



Fig. 11 | Teapot (1924), designed by Marianne Brandt: silver and ebony (credit: Bauhaus-Movement).

Arto Haapala (2005) identifies familiarity as a decisive category. Ordinary aesthetic experience coincides with a process of 'home building': the familiar is the place in which everything is under control and comfortable, where things appear where they ought to be. The aesthetic reveals itself in the relational coherence that makes a space habitable: «Strangeness is an attack on our home building nature, our desire of familiarity» (Haapala, 2005, p. 46). This is a condition that design may help establish or dissolve. From this perspective, Jane Forsey (2014) proposes replacing the notion of meaning with that of function as the central category of aesthetic appreciation. Functional excellence thus becomes a constitutive dimension of the aesthetic: an everyday object is aesthetically appreciated insofar as it works, that is, insofar as it is integrated smoothly into the practice for which it was designed.

What these positions share is the centrality of the immersive relation between individual and environment. Dewey set the pattern here. A well-designed device tends to integrate itself into practice to the point of becoming almost invisible; aesthetic quality coincides with fluidity of use and the coherence of interaction. Within this framework, design emerges as a paradigmatic phenomenon of everyday aesthetics: it intervenes directly in the conditions of experience, organising environments, objects, and interfaces in such a way as to make practices more coherent and more habitable.

Design works best when it is prosthetic, tending to disappear into the experience it makes possible. It is precisely on this terrain that a further distinction becomes necessary: between forms of intensification that emphasise prominence and forms of configuration that privilege harmony. The category of hypo-aesthetics will make it possible to articulate this difference, clarifying its implications for contemporary design.

Hyper-aesthetics and hypo-aesthetics: the bifurcation of aestheticisation | Contemporary aestheticisation, as we have seen, tends to assume the form of a permanent symbolic intensification: the aesthetic comes to coincide with prominence, excess, and continuous perceptual stimulation. Elisabetta Di Stefano (2017) has analysed this regime through the notion of hyper-aesthetics, understood in the double sense suggested by the Greek prefix 'hypér': 'above', but also 'beyond': an aesthetic dimension that exceeds its own disciplinary boundaries, and at the same time intensifies itself to the point of excess. The paradox of this regime is that beauty reproduced on an industrial scale loses its force, permanent intensification generates habituation, and iconic excess turns into anaesthetisation[9]. This is the risk already outlined earlier: that of a design reduced to the mere staging of value. It is from this diagnosis that Giovanni Matteucci (2016) introduces a decisive theoretical distinction, articulating two levels of aesthetic experience. The

first – which we may call hyper-aesthetic – operates through ostentation, symbolic intensification, and the production of prominence; the second – the hypo-aesthetic – operates in a largely tacit manner, helping to structure what Matteucci calls an 'aesthetic form of life'.

To mark the difference, Matteucci (2016) reserves the term 'aestheticisation' for the first level, recognising in the second a silent aestheticity that permeates ordinary experience without displaying itself. The transformations that have affected the canonical model of art – from diffuse authorship to experiential devices, and from collective reception to forms of signalling that are not necessarily professional – have rendered the hypo-aesthetic level visible, though it has always been present and only rarely thematised. They point to a shift from the work-event to shared practice, and to a reorganisation of the aesthetic on an intersubjective and operative basis.

Hypo-aesthetics designates precisely this side of experience: that relational configuration which attracts us because it expresses our sense of corresponding with the surrounding environment, the tacit harmony that sustains the flow of ordinary experience, beyond – indeed, prior to – spectacular prominence and the effect of surprise. Seen in this light, the hypo-aesthetic is not the opposite of the hyper-aesthetic, but its presupposition: only because everyday experience possesses an intrinsic aesthetic potential can that potential be intensified, amplified, or spectacularised. The hyper-aesthetic amplifies a potential that the hypo-aesthetic quietly preserves.[10]

From aesthetic bifurcation to design | The distinction between hyper-aesthetics and hypo-aesthetics concerns not only different modes of sensible experience; it bears directly upon the fate of contemporary design. Within the hyper-aesthetic regime, design tends to privilege formal prominence, immediate recognisability, and the capacity to attract. The object, or the environment, aspires to stand out and impose itself as an event, producing value through spectacularisation.

From the hypo-aesthetic perspective, by contrast, design is oriented towards a different logic: the aesthetic operates as the tacit structure of interaction, as a principle of integration that shapes the relation between subject and environment. The lines of Everyday Aesthetics here converge with Matteucci's reflection: the well-designed device becomes incorporated into action (Saito, 2007), familiarity becomes an aesthetic quality (Haapala, 2005), and function reveals itself as a constitutive dimension of appreciation (Forsey, 2014).

The centre of gravity thus shifts from representation to the configuration of practices: what matters is not the effect produced, but the set of relations that the object, or the device, makes possible. Contemporary design stands before this bifurcation: either to intensify experience, feeding dynamics of visibility and distinction, or to configure environments and devices in which aesthetic quality coincides with fluidity of use and the relational coherence of interaction.

It is on this terrain that design emerges as the privileged field in which hypo-aesthetics may be tested. If the aesthetic coincides with a relational quality of experience, then design may be defined as the configuration of conditions of correspondence between subjects, environments, and forms of life. It is on this plane that the following section will carry the analysis forward: no longer on the side of aesthetic categories as such, but on that of the design practices in which those categories are embodied, and put to the test (Iannilli, 2019b).

Design as intentional experientiality | In the introduction to the book entitled L'Estetico e il Quotidiano, Iannilli (2019a) states his purpose from the outset: to clarify how one of the principal aims of design is to make the aesthetic available within everyday life, translating it into an experience of use. The aesthetic, then, is not a quality attributed to individual objects; rather, it takes shape in the relation between subject, artefact, and context. It is upon this relation that design intervenes in order to configure its conditions and to orient its unfolding.

If the aesthetic has become a quality of experience itself[11] (Michaud, 2007), design represents its intentional configuration. Attention shifts from the object considered in isolation to the situation in which it operates: to the way in which it is encountered, understood, and used. It is on this terrain that Daniel Martin Feige's proposal is situated. Feige (2018) understands the functioning of design objects as an autonomous aesthetic category: not the contemplative lingering over the sensible qualities of things, but rather the practical forms [Praxisformen] of the aesthetic, incorporated into processes of interaction, and irreducible to any determinate meaning.

What design determines is the structure of interaction; the aesthetic emerges when that structure enables a correspondence between the possibilities offered by the device and the expectations of those who use it. Aesthetic quality thus manifests itself in the continuity between perception and use, and in the proportionate relation between intention and response.

Facilitation as a design criterion | Modern aesthetic tradition has recognised in artistic experience the capacity to include the disharmonious, the disgusting, and even the aporetic as positive values: from Kant's theory of the sublime (1790) – already grounded by Burke (1757) in a spectatorly attitude protected from any direct involvement – to contemporary elaborations on the aesthetics of disgust and disharmony (Feloj, 2017; Tedeschini, 2018). Designed experience follows a different logic. The everyday is the domain in which direct involvement never falls away: the aesthetic gratification it conveys is generated by relations of a harmonious kind, precisely because they are charged with supporting, and indeed facilitating, the operativity intrinsic to the dimension of practices (Iannilli, 2019a).

In design, aesthetic quality is measured by the success of the interaction: facilitation – understood as a fluid relation between perception and action – constitutes its distinctive criterion. A well-designed system renders its possibilities of use legible and allows them to be activated continuously. Gratification does not arise from a spectacular deviation, but from the operative coherence that sustains practice: everyday aestheticity manifests itself when the user feels immersed in the action, without experiencing the device as an obstacle.

If the proper functioning of a design can be regarded as an aesthetic criterion (Feige, 2018), and if the aesthetic quid of the everyday depends on the degree of facilitation afforded by the device (rather than on an aura that makes an object hyper-significant), then certain implications of contemporary design become easier to read. First: the 'aesthetic function' must be integrated with the 'use function', or rather assumed by it (Iannilli, 2019a): what pleases is what enables one to act, and what enables one to act well acquires aesthetic value. Second: the reduction of friction – the elimination of the superfluous, the optimisation of transitions, and the fluidity of access – constitutes a structural objective of design. Third: where design functions properly, the device becomes incorporated into practice to the point of becoming almost transparent. In short, the best design is prosthetic design: design that disappears into function, while generating aesthetic gratification.

One of the most eloquent examples of this logic of facilitation may be found in twentieth-century Italian design: the Sella stool by Achille and Pier Giacomo Castiglioni (1957). In the narrow corridors of Milanese homes in the 1950s, where the telephone was mounted on the wall, a stool with a stable base would have constituted an obstacle: a distracted knock, perhaps with a suitcase or shopping bags, would have caused it to fall over. The rocking hemispherical base of Sella resolves this problem at its root: the object absorbs the impact without toppling, adapts to movement, and leans against the wall. It also allows for a suspended posture – standing and sitting at once – proportioned to the use of the telephone in a confined space. Achille Castiglioni recalled that when using a public telephone he liked to move about, while also wanting to sit down, though not completely (Antonelli and Guarnaccia, 2000; Figg. 12, 13).[12]

Gratification here arises from the calibration of body, space, and function: the aesthetic coincides with the regulation of interaction. Sella is not an isolated case: Italian design had long been working on the relational quality of use well before the expression 'user experience' entered the design lexicon[13]. What elsewhere imposed itself as a structural transformation from the 1980s onwards – with the convergence of information technology and neuroscience, and the emergence of the desire / technology pairing as the new axis of design – had already found expression in Italy in a design tradition attentive to lived experience. It was precisely in those years that Flusser (2003) identified dematerialisation, interactivity, and pleasure as the features destined to redefine design at a structural level.

Marras and Mecacci (2015) reconstructed this trajectory as a succession of major polarities: from the nineteenth-century dialectic of beauty / utility to the modernist pair form / function, then to the twentieth-century substitution of consumption / image, and finally to the pair desire / technology, which, with the advent of the New Economy and the spread of Human-Computer Interaction (HCI), redefined design priorities: from 'usability' to 'user experience', in which emotional and aesthetic aspects become central. The shift from object to interaction thus became consolidated as a primary category of contemporary design.

Experience Design, interface, and relational space | If the New Economy and the widespread diffusion of HCI mark the shift from 'usability' to 'user experience', Experience Design takes the decisive step further. In User Experience Design, the

term 'user' still implies that mediation remains necessary: attention is focused on this mediator both in the design process and in use itself. In Experience Design, by contrast, the user is already called into responsibility: they have become a component of a process in which they participate by virtue of their ability to respond to specific stimuli.

The elimination of the term 'user' in the label seems to suggest that responsibility now lies entirely in the hands of design. It falls to design to ensure that a specific experience may be realised in the most efficient and gratifying way possible (Iannilli, 2019a), without any mediator imposing itself as an obstacle. The designer does not configure an experience for a user but rather arranges the conditions of an experience in which subject and device stand in relation to one another, a paradigm that Iannilli (2020) has systematically analysed in the book entitled The Aesthetics of Experience Design – A Philosophical Essay.

Within this framework, the notion of interface acquires a more general value. It is Bonsiepe (1995) who provides its key structural definition: the interface is not an object, but a space in which the interaction between the human body, the tool (understood as both an object-based and a communicative artefact), and the purpose of the action is articulated. This is, properly speaking, the irreducible domain of industrial and graphic design. In its most elementary conception, Iannilli (2019a) observes, it consists in a visible articulation of symbols and functions that makes an action possible. Such an articulation is, in effect, an articulation of saliences, based on appearances, interactivity, and the principle of being literally 'ready to hand' – one need only think, quite simply, of the touchscreen surfaces with which we interact every day. The notion, however, extends far beyond the screen. Clothing, lifestyles, buildings, and everyday environments may all function as interfaces: wherever subjects and objects enter into a structured relation. This relational logic also operates within the digital interface itself. Frost (2016) proposes that it be understood as a living system in which atoms – a button, a text field, an icon – combine into molecules, molecules into organisms, and so on until they form entire pages. Like LEGO bricks, which in themselves say nothing, but when assembled generate inhabitable environments, each element acquires meaning only within the network of relations into which it is inserted. The interface, however, does not merely organise: it acts, directs, and persuades.

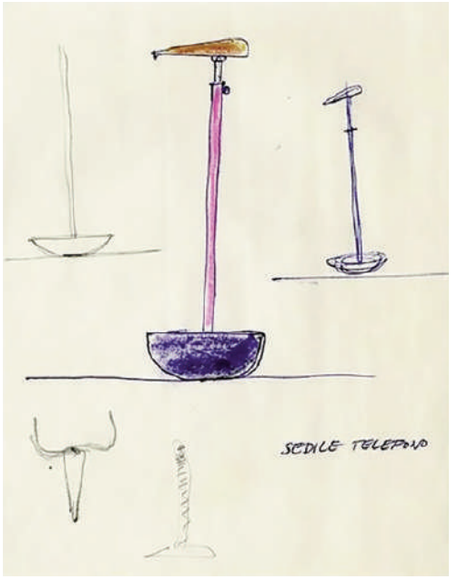
As Stock, Guerini, and Zancanaro (2018, p. 195) observe, the interface is designed «[…] to induce the user, or the audience in general, to perform certain actions in the real world». By taking social context into account, exploiting the surrounding situation, and enhancing the emotional aspects of communication, the interface becomes at once an instrument of gratification and persuasion. Every object thus becomes a node within an experiential network.[14]

Three projects, selected for their capacity to embody, in radically different contexts, the convergence between aesthetic quality and design responsibility, make it possible to test the robustness of this thesis. The first is the IO app, a digital platform that unifies access to the services of the Italian Public Administration, and which stands as an emblematic case of the shift in design's centre of gravity from the form / function relation to digital interaction; the Compasso d'Oro awarded to it in 2022 makes it one of the rare cases in which this shift has received explicit disciplinary recognition, thereby confirming the full dignity of digital Service Design as an autonomous design practice. The project takes shape as a relational infrastructure: payments, notifications, digital identity, and institutional communications converge within a single environment that recomposes the fragmentation of portals and procedures into a continuous, navigable pathway. The citizen's experience is reorganised into a coherent sequence of access points, in which interaction with the institution becomes legible and usable. The aesthetic emerges in the quality of the mediation between the public system and the user, in the fluidity of the interaction, and in the reduction of bureaucratic friction.

There remain, however, structural limits that circumscribe the scope of this facilitation: access presupposes the availability of a device, a connection, and minimal digital skills, thereby excluding those who lack them; the experience is configured within boundaries fixed by the institution, without the citizen having any voice in its design; and the infrastructure depends upon proprietary platforms, introducing an asymmetry of sovereignty into a public service (Prosperetti, 2026; Fig. 14).

The second case shifts the logic from digital infrastructure to physical space. The contemporary coffee shop is a diffuse, anonymous phenomenon, one that cuts across the metropolises of the world: a design without a single author, verifiable in the everyday experience of anyone at all, and for that very reason paradigmatic in a sense different from the other cases – not because it is exemplary, but because it is ordinary. In its more elaborated configuration, it is a commercial aesthetic space that synthesises multiple relational dimensions: the 'feeling at home' typical of private space (Haapala, 2005), the intersubjective and multisensory dimension of public space, and the global projection of virtual space. Its design – architectural, interior, sonic, and olfactory – aims to configure an inhabitable experience: one works, relaxes, socialises, observes trends, and consumes objects and lifestyles.

Here facilitation operates on an environmental scale: the user is immersed in a system of designed relations that orients practices, tastes, and behaviours. Aesthetic gratification coincides with feeling attuned to the environment, with the fluidity with which one moves through a space that seems made to measure, and which Iannilli (2019a) has analysed as a paradigmatic site in which the everyday aesthetic becomes designed experience. However, this case also reveals a limitation that the thesis





Figg. 12, 13 | Sella (1957), designed by Achille and Pier Giacomo Castiglioni: bicycle saddle, painted steel tube, and cast-iron base (source: achillecastiglioni.it; credit: Zanotta, 1983).



Fig. 14 | App IO (2019): digital platform for Italian public administration services (credit: PagoPA S.p.A.).

needs to recognize. The same logic of facilitation and of aesthetic gratification that makes the coffee shop a fluid and habitable experience may operate both in favour of genuine sociability and in the service of consumerist dynamics: the space is designed to make people feel at ease, but also to make them consume, and the two are often indistinguishable in lived experience. The aesthetic-ethical coincidence is fully operative here, but it is oriented by interests that the design does not make explicit, and that experience itself does not allow one to perceive. Added to this is the tendency towards global homogenisation: large chains replicate the same relational model in radically different contexts, achieving fluidity at the cost of indeterminacy (Fig. 15).

The third case shows how the same logic may directly invest the body. SuperPowerMe, developed at the Santa Chiara Fab Lab of the University of Siena by a transdisciplinary group of designers, orthodontists, engineers, and developers, is the most recent, and methodologically the most rigorous, of the cases examined here: a project in which the ethical dimension is not added to the design, but constitutes its originating reason. It begins from a precise clinical problem: children affected by Class III malocclusion must wear an orthodontic mask for at least fourteen hours a day, over a period that may exceed nine months. Traditional masks, cumbersome and visually stigmatising, generate resistance, and poor adherence to treatment. The project intervenes by rethinking the entire therapeutic experience: the mask is redesigned in biocompatible resin, and customised to the child's anatomy; a sensor system records the hours of use in real time, and transmits the data to the physician; and a video game incorporates those data into a narrative progression system, assigning resources and upgrades in proportion to consistency in treatment. The clinical obligation is thus absorbed into a motivational structure that mobilises imagination and play. The interpenetration of the physical and digital dimensions becomes tangible here: the device is inserted into an information network connecting patient, family, and healthcare professional, transforming the therapeutic act into an experience that is monitored, shared, and valorised.

Gratification is rooted in clinical efficacy and is consolidated in the quality of the pathway that supports adherence over time (Marti et alii, 2021). The aesthetic coincides with the configuration of this relational architecture, in which body, technology, and narrative converge in a single designed experience. The limit of this case, however, is inscribed within its very specificity: the project arises in a controlled clinical context, with transdisciplinary resources and competences that are difficult to replicate on a broader scale. The aesthetic-ethical coincidence appears especially clear here precisely because the conditions that make it possible are exceptional (Fig. 16).

In each of these projects, design acts as the configuration of relational conditions. The aesthetic manifests itself in the quality of that organisation, insofar as experience presents itself as coherent, navigable, and practicable. To structure an environment, however, always implies a choice: every interface distributes access, hierarchises possibilities, and makes some trajectories more evident than others. The order of experience is always the result of a precise design architecture and, as such, carries within itself choices and orientations. The same logic operates in contexts far removed from those examined here: Olivastri and Tagliasco (2024) analyse the design of Reuse and Repair Centres as touchpoints within service networks for the circular economy, showing how physical space there too is at once a relational infrastructure and an ethical device. In sustainability-oriented service design practice, ethics and aesthetics both call a system of values into question (Findeli, 1994), and their convergence is immanent to the form of the project, prior to any declaration of intent: the ethical dimension of design comes into view, inscribed in the very form of the relations that design makes possible.

Design as an ethical act: from aesthetic configuration to ethical implication | If design configures relational conditions – by structuring environments, organising interfaces, and distributing access – then every design choice already entails a position being taken: on who is facilitated and who is excluded, on which practices are rendered fluid and which are hindered, and on what form of coexistence is made practicable.The ethical dimension is inscribed in the very structure of the experience that design makes possible, even before it appears in the designer's intentions. As has been shown, the aesthetic operates as a relational quality of experience, a tacit structural principle that sustains the operative harmony between subject and environment. It is on this same ground that the ethical dimension is rooted, immanent to the form of designed experience. The theoretical shift proposed here is precise: from ethics as a criterion external to design to ethics as an internal effect of its configuration.

Ethics and design between responsibility and care | The twentieth century produced a range of responses to the problem of the relationship between ethics and design, yet all of them share an implicit assumption that is worth making explicit: ethics is conceived as an instance external to design, as a principle that directs, corrects, or constrains it from without. Reconstructing the principal inflections of this assumption also makes it possible to clarify why, despite progressively approaching the relational dimension of experience, none of them takes the further step towards the coincidence that this section seeks to argue.

Victor Papanek (1972) opens the debate with a radical position. At the beginning of the book entitled Design for the Real World, he does not hesitate to describe industrial design as one of the most harmful professions of modernity: complicit in the production of useless, dangerous objects, conceived for a market that systematically excludes the most vulnerable – the poor, disabled people, and populations in developing countries, broadly corresponding to what is now referred to as the 'Global South'. The accusation is direct: design

has placed its expertise at the service of irresponsible consumption, turning innovation into an instrument of profit, and aesthetics into commercial seduction.[15]

Against this diagnosis, Papanek sets a design practice oriented towards real needs: low-cost radios for remote communities, accessible therapeutic devices, and play environments for children with disabilities developed together with his students and distributed free of charge. Ethics thus takes the form of militant critique, and of an explicitly declared personal responsibility: the designer must choose where to stand. The relationship between ethics and aesthetics is one of explicit hierarchy – the former disciplines and directs the latter – and the ethical implication of design depends entirely on the intention of the designer.

Tomás Maldonado broadens the perspective from individual responsibility to systemic responsibility. In the definition presented at the ICSID conference in Venice in 1961, and later developed in the book entitled Disegno Industriale – Un Riesame (Maldonado, 1976), designing the form of a product does not mean intervening in its aesthetic appearance, but rather coordinating, integrating, and articulating all the factors that participate in the constitutive process of form itself: functional, symbolic, cultural, techno-economic, and techno-productive. From this perspective, form is always the result of a plurality of determinations – including, implicitly, ethical ones – and cannot be reduced to an a priori idea of aesthetic or aesthetic-functional value elaborated outside the constructive process (Maldonado, 2008). From this conception of form there emerges the broader, and more demanding, notion of industrial design as a 'total social phenomenon': that is, as something belonging to that category of phenomena which cannot be examined in isolation, but only in relation to other phenomena with which they constitute a single connective tissue (Maldonado, 2008). Design is therefore called upon to confront the environmental and social consequences of the technical-productive system as a whole, the distribution of priorities between symbolic and economic factors, and the way in which production and consumption unfold within a given society. Ethics thus takes the form of a critical awareness of the structural role design plays within industrial society, an awareness that lucidly anticipates the ecological question. Even in this case, however, it operates as an external horizon of reference: it defines the conditions of legitimacy of design without inhabiting its form.

With Ezio Manzini (2015), the centre of gravity shifts from responsibility to participation. In Design, When Everybody Designs, the starting point is a condition already noted by Vanni Pasca (2010, p. 422), according to which, we live in a 'designing society', in the sense that everyone must design everything, from their holidays to their work, to their life, and even the world that surrounds them. Within this horizon, the expert designer can no longer conceive of themselves as the sole protagonist of the process: their role becomes that of a mediator between different interests, and a facilitator of the ideas and initiatives of the other actors involved.

Manzini (2015), however, distinguishes this figure from what he calls 'post-it design': a bureaucratic reduction of the designer's role to that of a mere collector of opinions. The expert designer brings «[…] creativity and culture (i.e., their ability to conceive large scenarios and/or original design proposals) and the possibility of using them to trigger the social conversation and to feed it with new ideas» (Manzini, 2015, p. 49). Ethics thus takes the form of responsibility towards the community and of orientation towards social innovation: a commitment to making more sustainable forms of life possible, grounded in the expert's intention, and in their role within the co-design process. In the book entitled Politiche del Quotidiano, Ezio Manzini (2018) directs the same gaze towards the concreteness of everyday life, placing emphasis on what each person can do, alone or together with others, starting from where they are. Two themes in this text are especially relevant: collaboration and care. Collaboration becomes the very structure of the politics of everyday life, even before it is the method of the co-design process: it is a sequence of actions that influence the socio-technical systems within which one operates, and with which one enters into relation; actions upon the world that pertain to everyday life, carried out from where one stands (Manzini, 2018).

Care is the tone of this collaboration: we find ourselves in the midst of something whose existence is both precious and fragile, and which therefore needs to be cared for – a care that must be enacted by all those concerned (Manzini, 2018). Care, then, as a shared orientation towards what is worth preserving, and building together[16]. Ethics here becomes a collective and everyday practice, yet it remains an orientation that precedes design, without yet coinciding with its internal structure. It is in this dimension that Manzini's thought touches the threshold of the aesthetics of everyday life, the very terrain on which Saito works.

Yuriko Saito (2017, 2022) develops this perspective in its more specifically ethical dimension. In Aesthetics of the Familiar and Aesthetics of Care, she shows how everyday aesthetic experience possesses a practical force – the 'power of the aesthetic' – capable of orienting behaviour, shaping environments, and contributing to a 'better world-making'. Care towards the objects, spaces, and relations that surround us is inseparable from the aesthetic quality of experience: to care for something means perceiving it attentively, grasping the lines of tendency that run through a context, orienting one's action in their direction, and taking responsibility for them in the course of experience itself (Iannilli, 2019a). The aesthetic thus acquires an ethical valence immanent to everyday practices, approaching the threshold of coincidence without yet crossing it.[17]

The most sophisticated proposal comes from Luciano Floridi (2019, p. 26), who, in The Logic of Information, defines philosophy as conceptual design, namely «[...] the art of identifying and clarifying



Fig. 15 | Pavé Milano, interior view: contemporary café as designed relational environment (credit: Pavé Milano).

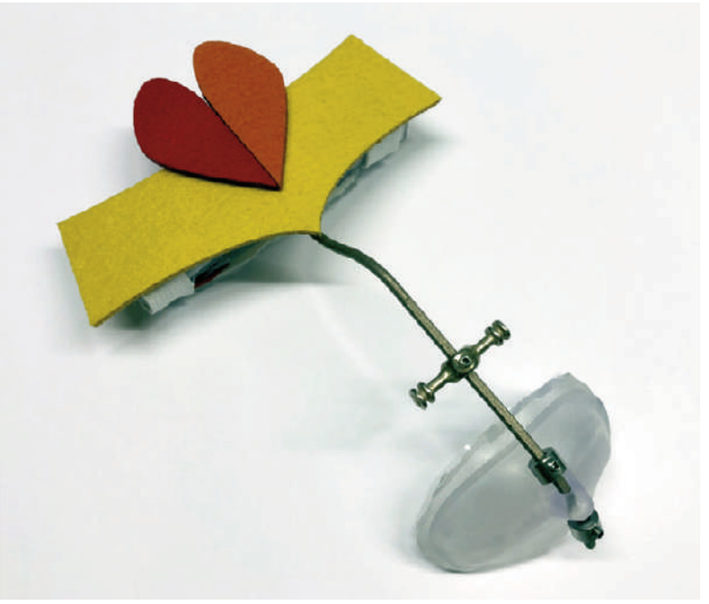


Fig. 16 | SuperPowerMe (2021): orthodontic mask redesigned in biocompatible resin with integrated sensor system (credit: Santa Chiara Fab Lab).

open questions and of devising, refining, proposing, and evaluating explanatory answers». Philosophical thought actively configures the world, producing models and orienting possibilities. Philosophy and design, therefore, share a fundamental structure: both are practices of configuring reality, and ethics finally seems to converge with design on a common plane[18]. Yet even in Floridi's work it remains a 'normative' discipline: it defines criteria and establishes orientations without inhabiting the form of design itself. Even the most radical proposal for integrating philosophy and design stops short of coincidence. The thesis advanced here takes that further step.

Ethics and aesthetics in designed experience | In Aesthetic Design, ethics and aesthetics do not enter into dialogue: they coincide within designed experience. This convergence becomes evident when one considers design operations that appear, at first sight, to be neutral. To facilitate an interaction already means selecting which users, what speed, and what kind of access are to be privileged. To simplify an interface means to establish hierarchies: something comes forward, something recedes, and something disappears. To render a pathway fluid means distributing possibilities asymmetrically. The ethical coincides with this distribution of the possible: a relational immanence inscribed in the very form of experience, irreducible to any normative superstructure.

Two cases already discussed may serve as examples. The SuperPowerMe project renders a therapeutic experience accessible and positively connoted, by intervening both in the form of the orthodontic device and in the affective field within which that experience is lived. The design of the contemporary coffee shop organises a form of sociability, a rhythm, and an idea of temporary community that extend well beyond the mere provision of a beverage. Those very lines of tendency that care identifies within everyday experience become objects of design codification: to weave together care and commercial aesthetic space means, as Iannilli (2019b) observes, identifying emergent dynamics and taking responsibility, through adaptive processes, for practices not yet codified. In both cases, the ethical inhabits the design from within: it is the very form of the experience that design produces. This coincidence is already operative in every design project, at the moment when it chooses what to facilitate and what to hinder, what to render visible and what to make disappear, what kind of relation to make possible and what kind to make difficult. Design cannot fail to be ethical, just as it cannot fail to be aesthetic: both dimensions are immanent to the very structure of designed experience. To recognise this means understanding the constitutive responsibility of design as something inscribed in its practice, rather than superimposed from outside. If Floridi (2019) has proposed reading philosophy as conceptual design, the reverse path is equally fruitful: design may be read as a 'practical philosophy', one that realises, in the concrete configuration of experience, that coincidence between form and value which no external normative framework could either guarantee, or replace.

Discussion and conclusions | The thesis developed in these pages has followed a precise trajectory: from the aesthetic primacy that led design towards the spectacularisation of the object, through the rediscovery of the everyday as the privileged site of aesthetic experience, to the claim that, in contemporary design, ethics and aesthetics coincide within designed experience. The centre of gravity has shifted from representation to the configuration of practices: what matters, more than the effect produced upon the observer, is the set of relations that the object, the device, or the environment makes possible.



Previous page

Fig. 17 | Do Hit Chair (2000), designed by Marijn van der Poll: steel cube and sledgehammer (credit: Droog).



Fig. 18 | Solar Bottle (2006), designed by Alberto Meda and Francisco Gomez Paz: transparent PET container for water purification through solar energy; prototype (source: designatlarge.it).

This thesis rests upon a distinction that has served as the hinge of the entire argument: that between hyper-aesthetics and hypo-aesthetics. Opposed to the regime of intensification and spectacularisation is an aesthetic quality that operates tacitly, structuring the relation between subject and environment without displaying itself. The category of correspondence – drawn from Matteucci (2016) and adopted here as a design category – describes this second register: the relational quality of an experience that succeeds because subject, artefact, and context stand in operative accord.

The design that works best, then, is a prosthesis that disappears. The Sella stool, the IO app, and SuperPowerMe display the same logic in radically different contexts: facilitation of interaction, reduction of barriers, and aesthetic quality as the success of experience. The ethical is immanent to this configuration: every design choice distributes access, orients practices, and renders some forms of life more practicable than others. It is a structural effect of the form of the project, one that precedes external normativity. Ethics and aesthetics both inhabit, constitutively, the structure of the experience that design configures. This thesis, however, has limits that deserve to be acknowledged with precision. The first concerns its field of application. The theoretical framework developed in the preceding pages – grounded in Everyday Aesthetics, in the logic of facilitation, and in the category of hypo-aesthetics – privileges a specific logic of design: that of continuity, operative harmony, and fluidity of use. It leaves aside, at least in part, another equally significant design tradition: one that works precisely by interrupting fluidity, producing aesthetic shock as an instrument of reflection.

A particularly eloquent example once again comes from Droog: Marijn van der Poll's Do Hit Chair (2000) presents the purchaser with a steel cube and a sledgehammer. The 'chair' does not yet exist: it must be won through repeated blows. Here design imposes a gesture, a choice, and a responsibility: to facilitate would be to betray the intention (Fig. 17). The aesthetic shock that Experience Design structurally excludes is here the principal means, and the intention is critical: to overturn the passivity of the consumer who receives objects 'already made'. The two logics – configuring experience or rendering it problematic – respond to radically different intentionalities and belong to registers of design that the distinction between hyper- and hypo-aesthetics, as formulated here, is not yet fully able to contain. To recognise this boundary is to strengthen the thesis by delimiting it. A thesis aware of its own limits is, for that very reason, a stronger one.

The second limit concerns the risk that an immanent ethics might slide into an automatic ethics. To maintain that the ethical is inscribed in the structure of every designed experience makes it possible to conclude that every project is, by definition, ethically oriented simply by virtue of existing. Here, the thesis requires a distinction that the proposed framework leaves open: between immanence as constitutive structure – design always, inevitably, has an ethical dimension – and immanence as guarantee – that this dimension is oriented towards the good. Always having an ethical dimension is not the same as being automatically virtuous: the co-responsibility of designer, client, and cultural context remains a variable that no structural coincidence of ethics and aesthetics can replace (Zannoni et alii, 2024). The third limit concerns power. The thesis shows that deciding what to facilitate and what to hinder, what to render visible and what to push into the background, always has ethical significance. Yet the question remains open as to who holds the power to design, and on the basis of which interests that decision is made. The Solar Bottle (2006) by Alberto Meda and Francisco Gomez Paz – a transparent PET container for purifying contaminated water through solar energy, and a project that is both ethically and aesthetically successful – remained a prototype: no manufacturer adopted it on an industrial scale (Fig. 18).

The ethical-aesthetic coincidence within designed experience presupposes that the project exists and is available for use; when market logics prevent this translation, the thesis encounters a limit that it cannot itself overcome. Aesthetic-ethical immanence may, under certain conditions, become an instrument for legitimising choices that respond to logics of control or exclusion. Once one moves to larger-scale systems – from the IO app to recommendation algorithms, urban architectures, and mass digital infrastructures – the same logic cannot hold without an analysis of the asymmetries that structure who designs, for whom, and with what consequences.

In terms of dissemination, the proposed theoretical framework meets barriers of a different nature. On the cultural side, the dominant tendency in contemporary design still privileges visibility and spectacularisation: hyper-aesthetic logics that make the institutional and commercial recognition of hypo-aesthetic practices difficult. On the economic side, the ethical-aesthetic coincidence requires more complex design processes and longer timeframes, often incompatible with market logics that reward speed and scalability.

On the technological side, the design of intelligent objects and systems introduces new criticalities: the sustainability of the user experience must contend with the environmental impact of digital components and the asymmetries between those who benefit from technology and those who bear its hidden costs. On the organisational side, the designer's responsibility extends far beyond the execution phase, affecting the entire value chain; yet this responsibility is often treated as an indirect effect of the process rather than as one of its founding factors (Zannoni et alii, 2024).

The thesis nonetheless retains significant transferability. It holds most firmly in contexts where the design is circumscribed, the intentionality is recognisable, and the relation between designer and user is direct, as in product design, small-scale service design, therapeutic design, and the design of digital interfaces. It also holds where the principles of facilitation are integrated from the earliest metadesign phases, as a structural condition rather than as a final correction: Arquilla and Caruso (2025) show, in the context of inclusion, that incorporating ethical criteria from the outset of the process produces more robust, and more transferable, results than any subsequent corrective intervention. By contrast, the thesis weakens in complex systems, in which experience is the outcome of a plurality of distributed and uncoordinated decisions, and in which power asymmetries make it difficult to attribute the configuration of experience to any identifiable design choice. Dialogue with other disciplinary fields – from architecture to urban planning, and from interaction design to public policy

– remains open and constitutes one of the most fertile horizons for future developments.

These limits trace the perimeter of the thesis, and indicate the directions in which theoretical work must continue: towards a design category capable of integrating those logics of interruption and aesthetic shock that the present framework does not yet manage to contain; towards a more articulated analysis of co-responsibility among designer, client, and cultural context; and towards the tools needed to read the ethical-aesthetic coincidence in larger-scale systems, where the asymmetries of design power require an attention that this essay has only been able to evoke. Aesthetic Design thus takes shape as an open perspective, rooted in contingency, and capable of reading contemporary design in all its ethical and sensible density, while knowing that such density requires, each time, a situated verification.

This contribution stands at the intersection of some of the most urgent challenges of the 2030 Agenda (UN, 2015). The link between the aesthetic quality of designed experience and the well-being of the user directly recalls SDG 3, as the case of SuperPowerMe shows with clarity, transforming a therapeutic obligation into a positively lived experience. The thesis according to which every project configures a relational infrastructure also enters into dialogue with SDG 9, which recognises innovation and infrastructure as strategic axes for equitable and sustainable development: to design well means to design infrastructures of access, not merely of performance.

SDG 10, on the reduction of inequalities, is perhaps the one most directly connected to the thesis: the question of who is facilitated and who is excluded, of which practices are rendered fluid and which are hindered, is the very question that runs through every design choice; and it is precisely the question that the ethical-aesthetic coincidence places at the centre of Aesthetic Design. SDG 12, on responsible consumption and production, finally brings into direct focus the hyper-aesthetic logic that dominated twentieth-century design: when form seduces and symbol sells, the designer's responsibility towards the models of consumption they help to produce becomes a dimension immanent to the design itself, inscribed in its very form.

Recognising this immanence does not resolve the tensions among these objectives – the ethical-aesthetic coincidence may also operate in the service of consumerist logics, as the coffee shop case makes clear – yet it does provide an instrument for reading them with greater precision, and for orienting design more consciously. Correspondence designates a quality of experience that design can either build, or destroy, and which must be judged in the concrete terms of the relations it produces.

Notes

1) It is worth noting that Dorfles (1972) here associates aesthetic quality with art: in his view, not every machine-made product is, in itself, artistic, and only those objects conceived from the design stage with that intention should properly be regarded as belonging to industrial design. Elsewhere, he places design midway between art and industry (Dorfles, 2010).

2) On the rooting of this logic in contemporary design, see Russo (2021), especially the chapter 'Nulla si vende bene da solo': 24 October 1929, Black Thursday, marks the collapse of the American economy and the end of one era, while inaugurating another, that of Loewy, a season that proved enduring because, in a certain sense, Raymond Loewy is still with us, auratically (Russo, 2021).

3) Particularly paradigmatic, in this respect, is the copy written for the Safari sofa (Archizoom, Poltronova 1967), which turns commercial communication into a cultural manifesto, subverting the language of advertising and making it a vehicle of social critique: the text presents an imperious object set against the squalor of domestic walls, an object declared more beautiful than its owners, and culminates in an exhortation to clear out both the sitting room, and life itself (Archizoom cited in R. Gargiani, 2007).

4) «In which the sign of infinity is interwoven with butterfly wings» (Cappellieri, 2008, p. 80).

5) For further information, see the webpage: dist.phillips.com/content/web/press/pdf_April_30_London.pdf [Accessed 27 March 2026].

6) For further information, see the webpage: christies.com/en/lot/lot-6302731 [Accessed 27 March 2026].

7) For further information, see the webpage: christies.com/en/lot/lot-5644731 [Accessed 27 March 2026].

8) Michaud (2007) argues that when beauty becomes omnipresent, artworks themselves seem to diminish; conversely, when art in the traditional sense recedes, an artistic sensibility spreads everywhere, colouring everything, as though art had volatilised into an aesthetic ether. Within a discussion that intertwines aesthetics and design, the parallel is striking between Michaud's notion of the vaporisation of art, namely aesthetic ether, and the idea of 'pulviscular design' advanced a few years later by Andrea Branzi (2010), who describes a particular kind of energy: weak, diffuse, capillary, yet highly effective; aligned with a non-aggressive idea of modernity; oriented not towards definitive solutions, but towards provisional devices, reversible arrangements, and elastic models; and averse to rigid archetypes, perfect masterpieces, and forms unsuited to an age in which everything must change, adapt, transform, and renew itself.

9) The term hyper-aesthetics also recurs in Michaud (2021), where it designates the pervasive and atmospheric regime of contemporary aestheticisation. Its use here is primarily diagnostic: it describes a condition in which the logic of emphasis is translated into constant perceptual stimulation.

10) The category of hypo-aesthetics, adopted here as an analytical and design tool, enters into an internally plural debate within aesthetics. Elisabetta Di Stefano (2017) has mapped with clarity the polarity between an 'expansive' and a 'restrictive' approach to Everyday Aesthetics: the former tends to include even special and occasional events capable of transcending routine, seeking to reconcile the ordinary and the extraordinary within an open dialectic; the latter aims to identify categories proper to ordinariness, confining inquiry to routinised, and widely shared practices. Matteucci's proposal, however, is not simply located within one of these orientations, nor does it proceed from within the debate on Everyday Aesthetics: it starts from a phenomenological distinction between the operative and the thematic, between experience and judgement, and, through the category of the hypo-aesthetic, seeks to add a third dimension, a form of low-voltage aesthetic energy acting beneath the surface of the very ordinariness that Everyday Aesthetics already thematises. Di Stefano nevertheless observes that the attempt to bring to light the hidden aesthetic potential of everyday things, the declared aim of the expansive line, of which Saito (2007) is among the principal exponents, generates a paradox: once disclosed, that potential 'compromises its very ordinariness' (Di Stefano, 2017). The hypo-aesthetic functions precisely because it remains tacit and incorporated in action; to make it explicit risks removing it from the very dimension that constitutes it. This is why the approach adopted in this work values the understated register of Matteucci's category, rather than subsuming it within a pre-existing classificatory scheme.

11) Michaud (2007) argues that where there were once works, there are now only experiences: in artistic production, works have been replaced by devices and procedures that function as works, generating the experience of art and of the aesthetic effect in their purity, almost without ties and with scarcely any support, apart from a configuration, or apparatus, of technical means capable of producing such effects.

12) The standard corridor in Milanese homes of the 1950s often measured between 80 cm and 1 m in width. It was precisely for this spatial condition that Sella was conceived: not as an object to be contemplated, but as a device to be inhabited.

13) Donald A. Norman (2013) theorises user-centred design as the principle according to which it is not the user who must adapt to the project, but the project that must adapt to the user. The later development of this paradigm, from user-centred to human-centred design, and finally to humanity-centred design, which incorporates the ethical and environmental dimension, will be taken up in the following sections.

14) The complexity of this network increases further when it includes intelligent objects and artificial agents: the sustainability of the user experience must then be assessed against the environmental impact of digital components, and against the asymmetries between those who benefit from technologies and those who bear their hidden costs (Arquilla and Paracolli, 2023); moreover, the designer's role becomes more problematic when experience is configured by autonomous computational infrastructures rather than by identifiable design decisions (Celaschi et alii, 2024).

15) Papanek's text (1972, p. 14) has a disruptive force: «There are professions more harmful than industrial design, but only a very few of them. And possibly only one profession is phonier. Advertising design, in persuading people to buy things they don't need, with money they don't have, in order to impress others who don't care, is probably the phoniest field in existence today. Industrial design, by concocting the tawdry idiocies hawked by advertisers, comes a close second. Never before in history have grown men sat down and seriously designed electric hairbrushes, rhinestone-covered file boxes, and mink carpeting for bathrooms, and then drawn up elaborate plans to make and sell these gadgets to millions of people. […] Before (in the 'good old days'), if a person liked killing people, he had to become a general, purchase a coal mine, or else study nuclear physics. Today, industrial design has put murder on a mass production basis. By designing criminally unsafe automobiles that kill or maim nearly one million people around the world each year, by creating whole new species of permanent garbage to clutter up the landscape, and by choosing materials and processes that pollute the air we breathe, designers have become a dangerous breed. And the skills needed in these activities are taught carefully to young people» These are cutting words that still strike home today, above all because they lucidly anticipate some of the most urgent issues of our time, namely planetary pollution, and the proliferation of waste, condensed in the image of 'new species of permanent garbage to clutter up the landscape': an almost prophetic formulation for the plastic materials that, in precisely those years, were beginning to invade the mass market, and the urban landscape.

16) Within this framework, according to Manzini (2018), a designer is any subject, whether individual or collective, when intervening in the world consciously, that is, with awareness of one's intentions and of the field of possibilities at one's disposal This definition of designer is very broad and

includes not only all those who institutionally operate as such (to whom Manzini shall refer by the expression 'design experts'), but also all those who, while not officially designers, act in the manner just described. The definition reprises and extends what had already been formulated in Design, When Everybody Designs (Manzini, 2015), relocating it within the context of everyday life: anyone who acts consciously upon the world, by collaborating, and by taking care, is already, in this sense, a designer.

17) It is precisely this intertwining of the moral and the aesthetic aspects of everyday experience that Iannilli identifies as the distinctive feature of Saito's proposal, defining it as an Aesthetics of Care in which both dimensions contribute to the desired project of building a better world (Iannilli, 2019a).

18) In his book entitled La Differenza Fondamentale, Floridi (2025) restates the idea of philosophy as conceptual design: it is necessary to remain not only critically vigilant, so that our moral coordinates may be able to accommodate, and shape, new developments, but also capable of imagination and innovation in conceptual design, which is how he understands philosophy, in order to identify the best solutions for laying the foundations of a sustainable, and socially preferable future. This, he argues, is good news for philosophy: there is a great deal of excellent, and crucial, conceptual work to be done in a collaborative, foundational, and innovative manner. What is urgently needed is a new philosophy of our time for our time, one that not only digs, deconstructs, analyses, unveils, or questions both old and new problems, but also produces, builds, elaborates, supports, and defends new solutions.

References

Agudio, E. (2013), *Designart – La poetica degli oggetti bastardi*, Lupetti, Milano.

Alison, F. and De Fusco R. (2018), *Artidesign*, Altralinea, Firenze.

Antonelli, P. and Guarnaccia, M. (2000), *Achille Castiglioni*, Corraini Editore, Mantova.

Arquilla, V. and Caruso, F. (2025), "Un approccio di integrazione nativa dell'inclusione nel meta-design – L'esperienza COmeta | Towards native integration of inclusivity in meta-design – The COmeta experience", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 17, pp. 360-373. [Online] Available at: doi.org/10.69143/2464-9309/17252025 [Accessed 4 April 2026].

Arquilla, V. and Paracolli, A. (2023), "Design sull'esperienza dell'utente e sostenibilità degli oggetti con intelligenza artificiale | User experience design and sustainability of AI-infused objects", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 13, pp. 259-268. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/13222023 [Accessed 4 April 2026].

Artprice (2010), *Il mercato dell'arte contemporanea 2009/2010 – Il Rapporto Annuale Artprice*. [Online] Available at: imgpublic.artprice.com/pdf/fiac10it.pdf [Accessed 27 March 2026].

Benjamin, W. (2002), *I passages di Parigi*, Einaudi, Torino.

Bill, M. (2010a), "Beauty from Function and as Function", in Bill, M. (ed.), *Form, Function, Beauty = Gestalt*, Architectural Association Publications, London, pp. 40-47.

Bill, M. (2010b), "Dreams of Life on The Dentist's Chair", in *Form, Function, Beauty = Gestalt*, Architectural Association Publications, London, pp. 157-159.

Bonsiepe, G. (1995), *Dall'oggetto all'interfaccia – Mutazioni del design*, Feltrinelli, Milano.

Branzi, A. (2010), *Ritratti e autoritratti di design*, Marsilio, Venezia.

Burke, E. (1757), *A Philosophical Enquiry into the Origin of our Ideas of the Sublime and Beautiful*, R. and J. Dodsley, London. [Online] Available at: archive.org/details/enqphilosophical00burkrich/page/n5/mode/2up [Accessed 27 March 2026].

Cappellieri A. (2008), *Ron Arad*, Electa, Milano.

Carmagnola, F. (2006), *Il consumo delle immagini – Estetica e beni simbolici nella fiction economy*, Mondadori, Milano.

Carmagnola, F. and Ferraresi, M. (1999), *Merci di culto – Ipermerce e società mediale*, Castelvecchi, Roma.

Celaschi, F., Casoni, G. and Formia, E. (2024), "La mediazione del Design – L'integrazione tra agenti artificiali autonomi, produzione manifatturiera e servizi | The mediation of Design – The integration between autonomous artificial agents, manufacturing production, and services", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 16, pp. 334-343. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/16282024 [Accessed 4 April 2026].

De Fusco, R. and Rusciano, R. R. (2015), *Design e Mezzogiorno tra storia e metafora*, Progedit, Bari.

Dewey, J. (2007), *Arte come esperienza* [or. ed. *Art as Experience*, 1934], Aesthetica, Palermo.

Di Stefano, E. (2017), *Che cos'è l'estetica quotidiana*, Carocci, Roma.

Dorfles, G. (2010), "Design né arte né industria", in G. Dorfles (ed.), *Design – Percorsi e Trascorsi – Cinquant'anni di riflessioni sul progetto contemporaneo*, Lupetti, Milano, pp. 83-88.

Dorfles, G. (1972), *Introduzione al disegno industriale – Linguaggio e storia della produzione di serie*, Einaudi, Torino.

Feige, D. M. (2018), *Design – Eine philosophische Analyse*, Suhrkamp Verlag, Berlin.

Feloj, S. (2017), *Estetica e disgusto – Mendelssohn, Kant e limiti della rappresentazione*, Carocci, Roma.

Findeli, A. (1994), "Ethics, Aesthetics, and Design", in *Design Issues*, vol. 10, issue 2, pp. 49-68. [Online] Available at: doi.org/10.2307/1511628 [Accessed 4 April 2026].

Floridi, L. (2025), *La differenza fondamentale – Artificial Agency – Una nuova filosofia dell'intelligenza artificiale*, Mondadori, Milano.

Floridi, L. (2019), *The Logic of Information – A Theory of Philosophy as Conceptual Design*, Oxford University Press, Oxford.

Flusser, V. (2003), *Filosofia del design*, Mondadori, Milano.

Forsey, J. (2014), "The Promise, the Challenge, of Everyday Aesthetics", in *Aisthesis | Pratiche, Linguaggi e Saperi dell'estetico*, vol. 7, issue 1, pp. 5-21. [Online] Available at: doi.org/10.13128/Aisthesis-14608 [Accessed 27 March 2026].

Francalanci, E. (2006), *Estetica degli oggetti*, Il Mulino, Bologna.

Frost, B. (2016), *Atomic Design*, Brad Frost, Pittsburgh.

Gargiani, R. (2007), *Archizoom Associati – 1966-1974 – Dall'onda pop alla superficie neutra*, Electa, Milano.

Grazioli, E. (2001), *Arte e pubblicità*, Mondadori, Milano.

Haapala, A. (2005), "On the Aesthetics of the Everyday – Familiarity, Strangeness, and the Meaning of Place", in Light, A. and Smith, J. (eds), *The Aesthetics of Everyday Life*, Columbia University Press, New York, pp. 39-55.

Iannilli, G. L. (2020), *The aesthetics of experience design – A philosophical essay*, Mimesis, Milano.

Iannilli, G. L. (2019a), *L'Estetico e il Quotidiano – Design, Everyday Aesthetics, Esperienza*, Mimesis, Milano.

Iannilli, G. L. (2019b), "Experience Design", in Franzini, E., Gatti, A., Griffero, T. and Matteucci, G. (eds), *International Lexicon of Aesthetics*, vol. 2, Mimesis, Milano, pp. 75-82. [Online] Available at: mimesisedizioni.it/download/14175/b50a42fbf804/lexicon-2019-def.pdf [Accessed 27 March 2026].

Jiménez, J. (2008), *Teoria dell'arte*, Aesthetica, Palermo.

Loewy, R. F. (1963), *La laideur se vend mal – Ou comment rendre beaux les objets nécessaires*, Gallimard, Paris.

Maldonado, T. (2008), *Disegno industriale – Un riesame*, Feltrinelli, Milano.

Manzini, E. (2018), *Politiche del quotidiano – Progetti di vita che cambiano il mondo*, Edizioni di Comunità, Roma.

Manzini, E. (2015), *Design, When Everybody Designs – An Introduction to Design for Social Innovation*, MIT, Cambridge (MA).

Marras, L. and Mecacci, A. (2015), "L'oggetto estetico nell'epoca dell'Ubiquitous Computing", in G. Matteucci (ed.), *Estetica e pratica del quotidiano – Oggetto, esperienza, design*, Mimesis, Milano, pp. 149-161.

Marti, P., Lampus, F., Recupero, A., Franchi, L., Goracci, C., Guercio, S. and Vichi, A. (2021), "Design Thinking as a Mindset Shift for Innovation in Healthcare", in *diid | Disegno Industriale – Industrial Design*, vol. 74, pp. 146-157. [Online] Available at: doi.org/10.30682/diid7421n [Accessed 27 March 2026].

Matteucci, G. (2016), "The Aesthetic as a Matter of Practices – From of Life in Everydayness and Art", in *Comprendre | Revista Catalana de Filosofia*, vol. 18, issue 2, pp. 9-28. [Online] Available at: dialnet.unirioja .es/servlet/articulo?codigo=5717429 [Accessed 27 March 2026].

Mecacci, A. (2012), *Estetica e design*, Il Mulino, Bologna.

Michaud, Y. (2021), *L'art c'est bien fini – Essai sur l'hyper-esthétique et les atmosphères*, Gallimard, Paris.

Michaud, Y. (2007), *L'arte allo stato gassoso – Saggio sul trionfo dell'estetica*, Idea, Roma.

Norman, D. A. (2013), *The Design of Everyday Things*, Basic Books, New York.

Olivastri, C. and Tagliasco, G. (2024), "Servizi per il riuso e il riparo – L'allestimento tra touchpoints e infrastrutture relazionali | Services for reuse and repair – The arrangement between touchpoints and relational infrastructures", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 15, pp. 324-331. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/15272024 [Accessed 4 April 2026].

Papanek, V. J. (1972), *Design for the Real World – Human Ecology and Social Change*, Pantheon Books, New York.

Pasca, V. (2010), "Il design del futuro", in *Enciclopedia del XXI Secolo – Gli spazi e le arti, vol. IV*, Istituto della Enciclopedia Italiana Treccani, Roma, pp. 421-431.

Prosperetti, E. (2026), "App IO, come usarla e migliorarla – La guida", in *Agenda Digitale*, 27/02/2026 [Online] Available at: agendadigitale.eu/documenti/app-io-come-usarla-al-meglio-la-guida/ [Accessed 4 April 2026].

Russo, D. (2021), *Vanità e socialità nel design – Icone e paradossi*, Mimesis, Milano.

Russo, D. (2013), *Il lato oscuro del design*, Lupetti, Milano.

Saito, Y. (2022), *Aesthetics of Care – Practice in Everyday Life*, Bloomsbury, London.

Saito, Y. (2017), *Aesthetics of the Familiar – Everyday Life and World-Making*, Oxford University Press, Oxford.

Saito, Y. (2007), *Everyday Aesthetics*, Oxford University Press, Oxford.

Stock, O., Guerini, M. and Zancanaro, M. (2018), "Interface Design and Persuasive Intelligent User Interfaces", in Bagnara, S. and Crampton Smith, G. (eds), *Theories and Practice in Interaction Design*, CRC Press, Ivrea, pp. 193-207.

Tedeschini, M. (2018), *Il conflitto estetico – Teoria del disgusto*, Lithos, Roma.

UN – United Nations General Assembly (2015), *Transforming our World – The 2030 Agenda for Sustainable Development*, document A/RES/70/1. [Online] Available at: sdgs.un.org/2030agenda [Accessed 7 April 2026].

Vitta, M. (2011), *Il progetto della bellezza – Il design tra arte e tecnica dal 1851 a oggi*, Einaudi, Torino.

Zannoni, M., Succini, L., Rosato, L. and Pasini, V. (2024), "Transitional industrial designer – La responsabilità di progettisti e imprese per una transizione sostenibile | Transitional industrial designer – The responsibility of designers and companies for a sustainable transition", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 15, pp. 332-343. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/15282024 [Accessed 4 April 2026].

AGATHÓN – International Journal of Architecture, Art and Design | n. 19 | 2026 | pp. 332-345
ISSN print: 2464-9309 – ISSN online: 2532-683X | doi.org/10.69143/2464-9309/19192026

Article Info

Received	17 March 2026
Revised	21 April 2026
Accepted	24 April 2026
Published	30 June 2026

IL DESIGN COME INFRASTRUTTURA RELAZIONALE
Università, territori e trasformazioni sistemiche

DESIGN AS RELATIONAL INFRASTRUCTURE
Universities, territories, and systemic transformations

Paolo Tamborrini, Dario Russo, Cristina Marino

Abstract

Nel dibattito sugli Obiettivi di Sviluppo Sostenibile n. 9 e 10 l'innovazione territoriale è spesso interpretata attraverso parametri tecnologici e produttivi, mentre le infrastrutture culturali e formative restano marginali. Il contributo propone di interpretare il Design come un'infrastruttura relazionale capace di connettere Università, territori e sistemi produttivi. L'analisi si basa sul confronto tra le due edizioni della rassegna Design&Territori (Palermo 2018 e Agrigento 2025), assunte come osservatorio delle pratiche progettuali universitarie. I risultati evidenziano da un lato un passaggio da un paradigma centrato sul prodotto a un approccio sistemico orientato ai servizi, alle reti e al rafforzamento delle capacità della comunità, dall'altro i limiti strutturali che ostacolano la stabilizzazione di tali processi.

In the debate on Sustainable Development Goals 9 and 10, territorial innovation is often interpreted through technological and productive parameters, while cultural and educational infrastructures remain marginal. This contribution proposes that Design be understood as a relational infrastructure capable of connecting universities, territories, and productive systems. The analysis is based on a comparison between the two editions of the Design&Territori exhibition and conference series (Palermo 2018 and Agrigento 2025), taken as an observatory of university-based design practices. The results show, on the one hand, a shift from a product-centred paradigm to a systemic approach oriented towards services, networks, and community capability-building and, on the other, the structural limits that hinder the stabilisation of these processes.

Keywords

design per i territori, innovazione territoriale, infrastrutture culturali, terza missione, design sistemico

design for territories, territorial innovation, cultural infrastructures, third mission, systemic design

Paolo Tamborrini, Full Professor with a double affiliation at the University of Parma and the Politecnico di Torino (Italy) and Editor-in-Chief of the journal Graphicus, conducts research on systemic design, innovation, and communication. E-mail: paolo.tamborrini@unipr.it

Dario Russo, Architect and PhD, is an Associate Professor at the Department of Architecture of the University of Palermo (Italy). His research mainly concerns the history of design, visual communication, user experience and interaction, and design culture. E-mail: dario.russo18@unipa.it

Cristina Marino, Researcher and PhD at the Department of Engineering and Architecture of the University of Parma (Italy), conducts research and teaching mainly in data-supported design for innovation and visual communication. E-mail: cristina.marino@unipr.it

L'Agenda 2030 delle Nazioni Unite (UN, 2015) ha riportato al centro del dibattito il legame tra innovazione, infrastrutture e riduzione delle disuguaglianze, con particolare riferimento agli Obiettivi di Sviluppo Sostenibile (SDG) 9 e 10. A oltre un decennio dalla sua adozione persiste tuttavia un problema epistemico: l'innovazione territoriale è codificata quasi esclusivamente attraverso parametri tecnologici, produttivi e istituzionali, mentre le dimensioni culturali, formative e relazionali restano sistematicamente marginali (Manzini, 2015; Sennett, 2018; Moulaert et alii, 2014). Scisso dai suoi presupposti formativi e relazionali lo sviluppo dei territori si traduce in interventi calati dall'alto, incapaci di sostenere il sostrato sociale: ne deriva un modello episodico ed estrattivo, privo di sedimentazione cognitiva (Torre, 2025), che disperde il capitale locale e amplifica le disparità di accesso all'innovazione che l'SDG 10 intende ridurre. La criticità è massima nei contesti storicamente marginalizzati, dove ogni intervento privo di ancoraggio relazionale rischia di riprodurre dinamiche di dipendenza (Cassano, 2005; Barca, McCann and Rodríguez-Pose, 2012).

Una corrispondente riduzione si verifica nella cultura progettuale; il Design viene infatti ancora interpretato secondo una logica funzionalista e strumentale, risoluzione lineare di criticità od ottimizzazione di processi produttivi: tale lettura separa il progetto dal suo spessore storico, simbolico e politico, inibendone la natura trasformativa (Manzini, 2018; Irwin, 2015) e depotenziandone la vocazione sistemica di fronte alla complessità delle transizioni contemporanee (Gaiardo et alii, 2022). Il quadro interpretativo qui proposto si iscrive in una riflessione dedicata alla complessità come condizione strutturale – etimologicamente un 'essere insieme' – e alla necessità di strumenti integrati di conoscenza, progetto e gestione (Sposito and Scalisi, 2024): entro questo orizzonte leggere il Design come infrastruttura relazionale significa proporre uno strumento specifico per affrontare la complessità territoriale senza ridurla a parametri settoriali.

L'originalità del contributo sta quindi nel leggere il Design come infrastruttura relazionale che incide strutturalmente sull'innovazione territoriale, superando la visione riduttiva del mero trasferimento di competenze al sistema produttivo. La Terza Missione diventa così spazio strategico di mediazione fra Università, imprese e comunità locali, configurandosi come ambito generativo di continuità cognitiva, responsabilità condivisa e apprendimento collettivo.

Tre sono gli obiettivi che ne derivano: costruire il quadro concettuale dell'ipotesi teorica; verificarla attraverso l'analisi longitudinale della rassegna Design&Territori (2018-2025), assunta come osservatorio delle pratiche progettuali delle sedi universitarie italiane di Design; collocarla entro un quadro di riferimento internazionale e nazionale che ne restituisca la specificità operativa. Il testo si articola in sei sezioni, dalla cornice concettuale alle riflessioni conclusive, passando per l'osservatorio empirico, la discussione dei limiti strutturali, il quadro comparativo e il ruolo del progetto in relazione agli Obiettivi di Sviluppo Sostenibile. Ne risulta un contributo che si colloca all'intersezione tra 'design studies' orientati alle pratiche territoriali, 'innovation studies' attenti alla dimensione relazionale dello sviluppo locale e studi sulla terza missione universitaria, in un quadro di riflessione che assume la complessità come condizione intrinseca del progetto e della conoscenza dell'ambiente costruito.

Design, formazione e infrastrutture culturali: una cornice critica | Il punto di partenza è un problema di statuto disciplinare: parlare di Design significa confrontarsi con una disciplina che storicamente sfugge a definizioni univoche, essendo stata descritta nel tempo come metodo, linguaggio, processo e sistema di competenze[1] (De Fusco, 1985). Questa instabilità definitoria è tutt'altro che un limite, poiché riflette la capacità del progetto di adattarsi a contesti diversi e di assumere funzioni conoscitive, critiche e operative differenziate. Riposizionare il Design come dispositivo culturale significa spostare il baricentro dal progetto inteso come risposta a una domanda data al progetto come atto interpretativo, costruzione di narrazioni e produzione di conoscenza condivisa. Tale spostamento ha conseguenze profonde sul piano sia teorico sia operativo e trova un crescente riscontro nella letteratura internazionale sul 'design per le transizioni' (Irwin, 2015; Escobar, 2018).

Questo riposizionamento diventa particolarmente urgente quando il progetto si confronta con i territori; i luoghi non sono semplici contenitori geografici ma costruzioni storiche, simboliche e relazionali, esito di stratificazioni materiali e immateriali, di economie locali, di memorie condivise e di narrazioni spesso conflittuali. Il Design è chiamato quindi a confrontarsi con i territori, riconoscendo che una conoscenza olistica delle componenti naturali, sociali e culturali di un contesto è condizione necessaria per progettare l'innovazione in modo realmente trasformativo (Tamborrini and Stabellini, 2018; Barca, McCann and Rodríguez-Pose, 2012).

Gli approcci del Design for Territories[2] (Parente and Sedini, 2017) e del Place Design[3] (Braunerhielm, 2025) convergono su questo punto: il territorio va inteso come ambito di interazione in cui il Design opera come pratica interpretativa, un dispositivo capace di rendere visibili le relazioni latenti e di tradurre la complessità in forme intelligibili. Il passaggio concettuale cruciale è quello dalla progettazione per i luoghi alla progettazione con le persone e i luoghi (Manzini, 2015; Braunerhielm, 2025); tale passaggio implica, strutturalmente, la relazionalità, la partecipazione e il radicamento locale (Escobar, 2018).

La dimensione narrativa e metaforica del progetto ha uno statuto epistemico preciso: produce rappresentazioni che consentono di esplorare problemi articolati[4] (Cross, 2006; Visser, 2006), di connettere memoria, presente e visioni future e di attivare connessioni trasversali senza imporre soluzioni univoche; inoltre favorisce la sedimentazione di un capitale culturale capace di affrontare la complessità senza ridurla a schemi semplificati. In tale processo assume rilievo strutturale il tema della fiducia, intesa come condizione abilitante per la cooperazione e la costruzione di visioni condivise[5] (Putnam, Leonardi and Nanetti, 1993; Putnam, 2000): nei contesti territoriali complessi il progetto ha il compito specifico di creare e mantenere le condizioni affinché relazioni, aspettative e responsabilità possano essere negoziate nel tempo (Bistagnino, 2016). La formazione è il terreno in cui questa concezione del design si misura nelle sue implicazioni più concrete; qui la 'sostenibilità dei processi formativi' nei processi di sviluppo locale non va confusa con l'erogazione di programmi di aggiornamento tecnico, perché rischia di ridurre la formazione a un addestramento subalterno alle esigenze di mercato. Una tale dinamica, documentata con crescente preoccupazione nel dibattito accademico italiano e confermata da tendenze analoghe in contesti europei e nordamericani (Loorbach and Wittmayer, 2023), esprime infatti una domanda strutturalmente conservatrice, ricercando profili 'immediatamente operativi' e relegando il designer a un ruolo di operatività tecnica, denotando una drastica indisponibilità all'investimento formativo sul campo come evidenziato nel capitolo 'Il design corre più veloce del suo riconoscimento?' del Rapporto Design Economy 2026 (Fondazione Symbola et alii, 2026).

La vera sostenibilità dei processi formativi si realizza quando il percorso di ampliamento delle conoscenze è strutturato come infrastruttura 'soft', intesa come insieme di condizioni relazionali, cognitive e organizzative che rendono possibile la continuità e la sedimentazione dei processi di innovazione nel tempo. In questo quadro l'Università cessa di essere erogatore di servizi standardizzati per diventare un nodo di sperimentazione radicata nei territori, spazio in cui la conoscenza si produce nell'interazione tra discipline, Istituzioni e comunità (Petersen, Kruss and van Rheede, 2022), configurando l'ambiente accademico come infrastruttura 'soft' orientata alla sostenibilità dei sistemi complessi e alla ricerca multidisciplinare (Langella, Russo and Scalisi, 2024).

Nell'intersezione tra progettazione e formazione il Design rivela la sua matrice più profonda, ovvero pratica di emancipazione, nel senso che Bell Hooks (1994) attribuisce all'educazione come pratica della libertà. Senza infrastrutture educative e relazionali radicate l'evento innovativo resta slegato dal tessuto sociale che dovrebbe accoglierlo, elaborarlo e riprodurlo nel tempo. Un progetto separato dal suo spessore storico e simbolico perde la capacità di dialogare con il territorio come orizzonte di senso: l'innovazione si esaurisce nel momento della sua manifestazione senza lasciare tracce strutturali nei contesti ospitanti.

L'osservatorio critico delle pratiche progettuali universitarie come indicatori | Per verificare la tesi che inquadra il progetto come infrastruttura relazionale il saggio adotta una prospettiva di indagine basata sull'analisi longitudinale di un ampio bacino di esperienze applicate. Il corpus di pratiche progettuali raccolto nelle due edizioni della rassegna espositiva e convegnistica D&T – da Palermo 2018 ad Agrigento 2025 (Fig. 1; Pasca, Russo and Tamborrini, 2018; Russo and Tamborrini, 2019; Benincasa, Russo and Tamborrini, 2025) – viene assunto come dispositivo epistemico. I due cataloghi fungono da osservatorio privilegiato per leggere le dinamiche evolutive nel rapporto tra sedi universitarie, tessuto produttivo e comunità locali.

Il corpus analizzato comprende 150 progetti, realizzati da 18 sedi universitarie in collaborazione con oltre 70 partner territoriali, tra cui piccole e medie imprese, Pubbliche Amministrazioni ed Enti del Terzo Settore. Questa ampiezza del campione consente di confrontare le traiettorie evolutive delle pratiche progettuali, non come modelli replicabili, ma come indicatori di un mutamento progressivo del ruolo del Design universitario nei confronti dei processi di innovazione territoriale. Sotto il profilo metodologico l'analisi si fonda su una codifica tema-

tica delle descrizioni progettuali pubblicate nei cataloghi, integrata da una classificazione tipologica dei partner coinvolti e delle ricadute territoriali dichiarate. Le categorie interpretative sono state costruite induttivamente a partire dai dati e successivamente validate mediante confronto incrociato tra le due edizioni, al fine di garantire coerenza analitica e comparabilità diacronica. Il contributo si configura pertanto come uno studio teorico-empirico a carattere comparativo, fondato su un'analisi qualitativa longitudinale delle pratiche documentate. L'obiettivo non è elaborare una tassonomia prescrittiva, né proporre modelli universalmente trasferibili, ma individuare dinamiche ricorrenti e tensioni strutturali capaci di illuminare il ruolo del Design universitario nei contesti territoriali: il corpus funge da dispositivo interpretativo che consente di leggere in controluce le trasformazioni in atto.

In un contesto in cui la storia del Mezzogiorno è stata a lungo interpretata attraverso una dicotomia rigida tra centro e periferia (Cassano, 2005) l'insieme delle pratiche analizzate contribuisce a delineare una contro-narrazione, mostrando come i territori marginali possano configurarsi come ambiti di sperimentazione progettuale e innovazione situata, sottraendosi a una visione lineare del progresso (De Fusco and Rusciano, 2015; Russo, 2020): il progetto agisce come pratica relazionale capace di rendere visibili traiettorie plurali di modernità radicate nei contesti. Dal confronto diacronico tra le edizioni del 2018 e del 2025 emerge uno slittamento strutturale nel paradigma progettuale.

Nel 2018 l'orientamento prevalente dei partenariati risultava fortemente concentrato sul comparto manifatturiero tradizionale (arredamento, moda, automotive e cibo; Fig. 2), con l'obiettivo dichiarato di innalzare gli standard qualitativi per la competitività di mercato. Le discipline dominanti – prodotto, interni e materiali – riflettevano tale impostazione, configurando un modello centrato sull'ottimizzazione dell'esito materiale e sulla prestazione dell'oggetto (Figg. 3, 4); in questa fase l'impatto territoriale era mediato quasi esclusivamente dalla dimensione produttiva.

Nel 2025 il quadro risulta significativamente trasformato; pur rimanendo centrale il ruolo delle piccole e medie imprese e dei distretti artigiani (55%) si consolida la presenza di nuovi interlocutori (Fig. 5): Enti del Terzo Settore (28%) e Pubbliche Amministrazioni locali (17%). Tale redistribuzione segnala una ridefinizione del perimetro dell'azione progettuale che si estende oltre la logica di filiera produttiva per coinvolgere attori istituzionali e comunitari nei processi di innovazione sociale come nel progetto COmeta (Arquilla and Caruso, 2025) o nelle recenti mappature sulle traiettorie di trasformazione dei sistemi produttivi circolari e della formazione informale (Franzo, Quartu and Tufarelli, 2025). Un esempio significativo è la collaborazione con la Fondazione Val di Seren ONLUS, in cui exhibit e interaction design operano come dispositivi di attivazione identitaria collettiva e di riappropriazione del Patrimonio locale (Fig. 6).

Parallelamente si registra una ridefinizione delle aree disciplinari prevalenti; i risultati progettuali del 2025 (Fig. 7) si articolano in misura preponderante nell'ambito del Design dei Servizi e del Design Strategico (46%), seguiti dal Design della Comunicazione (32%) e dal Design del Prodotto (22%). Persino quando l'esito formale si concretizza in un artefatto fisico o in una mostra itinerante l'oggetto è concepito come nodo di un sistema relazionale ed ecosistemico più ampio e la trasformazione si riflette anche nelle ricadute territoriali dei progetti.

L'analisi ha classificato gli esiti in tre macrocategorie: capacitazione comunitaria e coesione sociale (40%), dove il Design agisce come facilitatore per categorie fragili o comunità marginalizzate; innovazione organizzativa e di processo per le filiere locali (35%), orientata alla transizione verso modelli di economia circolare, in cui il progetto agisce come dispositivo di tessitura di micro-reti territoriali (Gaddi and Mastrolonardo, 2024); rigenerazione urbana e valorizzazione del Patrimonio (25%), attraverso pratiche di branding territoriale e percorsi museali ibridi (Fig. 8). In questa prospettiva si colloca anche il progetto di identità visiva Rete Tetide per i parchi naturali della Puglia (Fig. 9), nel quale il Design della Comunicazione agisce come infrastruttura sistemica capace di coordinare territori, sostenere economie locali e promuovere educazione ambientale mediante un sistema visivo modulare (Fig. 10).

La lettura comparativa evidenzia tensioni strutturali rilevanti; l'intensificazione della dimensione relazionale e sistemica rende più visibile la fragilità delle condizioni che sostengono tali pratiche; la collaborazione tra Università e imprese può assumere forme di sussidiarietà funzionale con il rischio di ridurre il progetto a fornitura di servizi a basso costo; molte esperienze generano capitale cognitivo e relazionale significativo, ma incontrano difficoltà nel consolidarsi come infrastrutture stabili quando si esauriscono il dispositivo didattico o il finanziamento a breve termine che le ha rese possibili. In questo scarto tra intensità progettuale e debolezza strutturale si colloca una delle tensioni centrali dell'innovazione territoriale contemporanea dalla quale prende avvio l'analisi delle dinamiche ricorrenti e dei vincoli strutturali che incidono sulla stabilità dei processi nel tempo.

Dinamiche ricorrenti e limiti strutturali: quando l'innovazione non sedimenta | Coerentemente con quanto discusso in precedenza l'attenzione analitica deve spostarsi dagli esiti formali dei singoli progetti alle condizioni strutturali che rendono possibile – o viceversa ostacolano – la sedimentazione dell'innovazione nei contesti locali. Il nodo problematico risiede infatti in quel complesso ecosistema di condizioni normative ed economiche che condanna le pratiche progettuali a una dimensione puramente episodica.

Quando l'innovazione non sedimenta si assiste a una dispersione sistematica del capitale cognitivo e relazionale e l'infrastruttura abilitante fallisce nel suo compito. I limiti strutturali emergono nei contesti marginali, come quelli del Mezzogiorno, dove il progetto si misura con storiche discontinuità e fragilità radicate; in questi contesti il Design rischia di ridursi a uno strumento di semplificazione e omologazione ogni volta che perde il proprio carattere situato e la capacità di assumere il territorio come orizzonte di senso entro cui instaurare un dialogo consapevole e duraturo.

Osservando le dinamiche operative sui territori un primo indicatore ricorrente è la centralità strategica dei dispositivi intermedi – piattaforme collaborative, laboratori civici, incubatori didattici, Centri di ricerca applicata – che operano come interfacce 'porose' tra la rigidità istituzionale dell'Università, le istanze del tessuto produttivo e i bisogni della cittadinanza, come mostrano le sperimentazioni sui distretti collaborativi di prossimità (Crippa et alii, 2024). La loro utilità è però controbilanciata da un'intrinseca fragilità: quasi sempre legati a finanziamenti a termine, bandi competitivi di breve respiro o iniziative volontaristiche di singoli ricercatori, questi dispositivi faticano a istituzionalizzarsi in modo stabile.

Un'analoga instabilità caratterizza le reti interistituzionali, la cui tenuta è costantemente minacciata da limiti radicati nel sistema. Sul piano delle

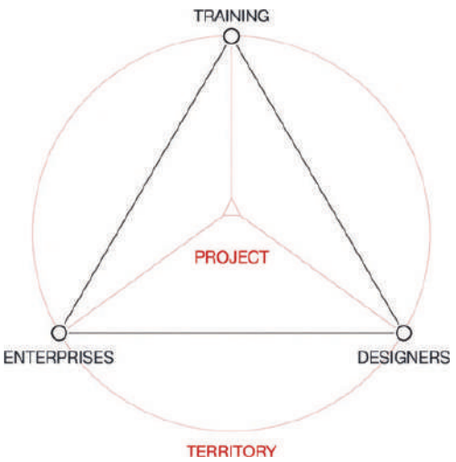




Fig. 1 | Ecosystem within which the D&T experience is articulated (credit: C. Marino, 2018).

Fig. 2 | Categories and figures for the 2018 edition of D&T (credit: C. Marino, 2018).



Fig. 3 | The product-oriented paradigm: furniture prototype exhibited at the Design&Territori exhibition and conference in Palermo (2018 edition), evidence of a design phase primarily focused on manufacturing culture and on raising corporate quality standards, resulting from the collaboration between the University of Camerino and the company Guzzini (credit: University of Camerino, 2018).

politiche pubbliche si avverte l'urgenza di superare interventi frammentari e settoriali[6] (Mortati et alii, 2016) per investire con coraggio in visioni tali da orientare le trasformazioni territoriali nel tempo, rafforzando in modo permanente competenze, relazioni e forme di mediazione tra attori diversi.

In tale orizzonte il progetto dovrebbe assumere organicamente una funzione di facilitazione e mediazione, riducendo il peso di logiche puramente prescrittive e di un rigido controllo burocratico che invece continua ad agire come un formidabile dispositivo di attrito, ostacolando, rallentando e talvolta inibendo quelle dinamiche collaborative che richiederebbero, per loro natura, estrema agilità e flessibilità.

A questo limite normativo si aggiunge l'impatto della 'precarietà accademica': la gran parte delle pratiche di ricerca sul campo – specialmente quelle più prossime alle comunità marginali – sono condotte da giovani ricercatori la cui discontinuità contrattuale si traduce in una discontinuità della presenza sul territorio, recidendo quei legami fiduciari che costituiscono il fondamento dell'infrastruttura soft[7] (Petersen, Kruss and van Rheede, 2022; Loorbach and Wittmayer, 2023; Ferreira and Quesado Delgado, 2024). La dimensione relazionale del progetto, e in particolare il tema della fiducia come condizione abilitante per la cooperazione e la costruzione di visioni condivise (Putnam, Leonardi and Nanetti, 1993; Putnam, 2000), dipende da una continuità temporale che l'intermittenza strutturale della forza lavoro accademica sistematicamente vanifica.

Il terzo limite strutturale riguarda il mancato riconoscimento istituzionale della didattica trasformativa e delle pratiche di Terza Missione ad alta intensità relazionale. I sistemi di valutazione accademica continuano a premiare prevalentemente la produzione bibliometrica misurata attraverso indicatori standardizzati, spesso indifferenti alle ricadute territoriali e ai processi di costruzione del capitale relazionale; sul versante didattico i criteri di valutazione si appiattiscono su parametri di efficienza quantitativa – numero di laureati e regolarità dei tempi di conseguimento del titolo – trascurando la qualità e la profondità dell'esperienza formativa sul campo. Si produce così un disallineamento sistemico tra ciò che genera valore territoriale nel medio-lungo periodo e ciò che viene effettivamente premiato nei meccanismi di carriera e di finanziamento universitari. Le pratiche di Design che operano come infrastrutture relazionali – lente, cumulative e fondate sulla costruzione di fiducia e continuità – risultano strutturalmente svantaggiate rispetto a modelli di ricerca più rapidi, individualizzati e facilmente quantificabili; di conseguenza l'impegno profuso nella Terza Missione viene progressivamente marginalizzato, declassato e relegato a un mero obbligo amministrativo di natura episodica. Eppure, a fronte di un mercato del lavoro sempre più orientato verso logiche esecutive (Fondazione Symbola et alii, 2026), proprio la Terza Missione rappresenta il luogo privilegiato in cui il Design può operare come pratica infrastrutturale, restituendo agency ai territori e costruendo continuità cognitiva e relazionale: finché la cura dei contesti e il lavoro di mediazione non riceveranno un riconoscimento strutturale l'innovazione territoriale rimarrà l'esito eccezionale di sforzi individuali dispersi, incapace di sedimentarsi come infrastruttura stabile.

Un quadro di riferimento internazionale e nazionale | Per collocare l'esperienza D&T entro un quadro comparabile si sono individuate iniziative internazionali e nazionali sulla base di quattro criteri: 1) presenza di Università come snodo della rete; 2) relazioni strutturate e continuative con partner territoriali non accademici; 3) produzione di artefatti progettuali e non di sola elaborazione teorica; 4) durata pluriennale. La selezione ha portato a tre casi internazionali – DESIS Network, AHRC Design Exchange Partnerships e Design Factory Global Network – e a un caso nazionale di confronto, il sistema delle Delegazioni Territoriali di ADI.

Il DESIS Network[8] – Design for Social Innovation towards Sustainability – è una rete accademica internazionale fondata nel 2009 da Ezio Manzini e formalmente costituita come associazione no-profit nel 2014, che riunisce sessantotto laboratori di design in trentadue Paesi, con sede presso Scuole e Università di design. I DESIS Lab dialogano attraverso programmi tematici coordinati e operano con partner locali, regionali e globali per orientare ricerca e didattica verso pratiche di innovazione sociale, configurando un modello reticolare bottom-up in cui la scala globale si sostiene senza indebolire la radicalità locale dei progetti (Manzini, 2015).

Le Design Exchange Partnerships costituiscono il nucleo operativo di Future Observatory – Design the Green Transition, programma pubblico promosso dall'Arts and Humanities Research Council britannico in partenariato con il Design Museum di Londra. Con un investimento di cinquantanove milioni di sterline, le Design Exchange Partnerships connettono oltre cento Istituzioni di formazione superiore con circa settantacinque partner territoriali in progetti triangolari a durata breve, orientati a esiti applicati nella transizione ecologica. Il modello è top-down, coordinato da una politica di ricerca nazionale.[9] Il Design Factory Global Network, attivo dal 2011 con pivot presso la Aalto University (Finlandia) e oggi composto da oltre trentacinque membri in cinque continenti, è una rete di hub di innovazione ospitati presso università e Istituzioni di ricerca; ogni Design Factory opera come piattaforma di co-creazione tra ricerca accademica, studenti e industria, sviluppando prodotti, servizi e prototipi con partner territoriali. Il caso di Design Factory Aveiro – integrata nel Creative Science Park della regione di Aveiro e connessa all'Institute ID+ dell'Università di Aveiro – esemplifica un modello in cui il design media tra accademia e tessuto economico locale (Design Factory Global Network, 2024).[10]

Sul piano nazionale il sistema delle tredici Delegazioni Territoriali dell'Associazione per il Disegno Industriale (ADI) – fondata nel 1956 e organizzata attorno al Premio Compasso d'Oro – costituisce la più capillare infrastruttura di radicamento territoriale della cultura del design in Italia. Le Delegazioni svolgono funzioni di scouting locale, preselezione



Fig. 4 | The product-oriented paradigm: coffee-maker prototype developed in collaboration with Lavazza and exhibited at the Design&Territori exhibition and conference in Palermo (2018 edition), evidence of a design phase primarily focused on corporate culture and innovation processes (credit: Innovation Design Lab, Politecnico di Torino, 2018).

delle candidature al Premio e promozione culturale. Il loro limite riconosciuto è tuttavia quello di operare prevalentemente in una logica di riconoscimento e premialità dei progetti esistenti, senza generare direttamente processi progettuali continuativi sui territori.[11]

Il confronto con i casi individuati colloca D&T in una posizione strategica. I tre riferimenti internazionali esemplificano modelli diversi – rete accademica bottom-up, programma pubblico top-down, rete interaccademica a vocazione industriale – accomunati dalla capacità di produrre artefatti progettuali attraverso relazioni strutturate con partner territoriali. Il caso nazionale ADI, pur rappresentando la più consolidata infrastruttura di radicamento territoriale del design italiano, opera in una logica prevalentemente di riconoscimento ex post: registra, seleziona e premia progetti maturati altrove ma non genera direttamente processi progettuali continuativi.

Rispetto a questi riferimenti la specificità di D&T risiede in tre elementi convergenti: è iniziativa generativa e non solo ricognitiva, seleziona e premia progetti attraverso un sistema collaborativo di curatela e non solo documentazione; è espressione diretta del sistema universitario italiano di Design, radicata nelle diciotto sedi nazionali; opera con continuità attraverso la rassegna come infrastruttura periodica di restituzione e confronto. Non si tratta di sostenere la superiorità del modello, ma di individuare una specificità operativa – la combinazione tra produzione progettuale, radicamento universitario nazionale e periodicità documentata – che i casi comparati, ciascuno per ragioni proprie, non esprimono contemporaneamente.

Il Design nei processi di innovazione territoriale | Le dinamiche emerse dall'osservatorio D&T documentano una trasformazione già in corso: il progettista assume la complessità dell'innovazione territoriale come parte ordinaria del proprio lavoro. Privo della forza coercitiva della decisione politica, opera come facilitatore: rende visibili relazioni latenti, traduce la complessità in forme intelligibili, connette scale locali e globali. La figura del progettista eccede così la dimensione tecnica per configurarsi come operatore culturale e relazionale (Manzini, 2015, 2018; Irwin, 2015).

In questa lettura la piattaforma espositiva e la rete dei laboratori universitari funzionano come infrastruttura soft: il progetto diventa dispositivo di convergenza in cui didattica, ricerca e impresa si alimentano a vicenda. I percorsi di collaborazione si trasformano in occasioni di formazione bidirezionale: preparano gli studenti a governare la complessità dei sistemi reali e offrono alle PMI del territorio – spesso piccole e medie imprese escluse dai grandi circuiti dell'innovazione – un'opportunità di aggiornamento culturale e strategico.

L'Università attiva processi di apprendimento reciproco con l'ecosistema territoriale: benché circoscritte alla durata di un semestre o di un anno accademico, queste collaborazioni tessono reti intangibili che generano continuità, memoria e fiducia ben oltre la fine del singolo progetto[12] (Putnam, Leonardi and Nanetti, 1993; Putnam, 2000), sedimentando nelle imprese una più matura consapevolezza del valore strategico del Design e formando nei futuri professionisti un approccio sistemico-relazionale.

Un caso storico esemplare è la vicenda di Alexander Hardcastle nella Valle dei Templi, in cui l'azione continua sul Patrimonio si fa infrastruttura e dispositivo di fiducia comunitaria (Parello, 2008; Savatteri, 2025): la cura prolungata di un luogo è esattamente ciò che il Design, in quanto pratica infrastrutturale, dovrebbe produrre nei territori.

Queste pratiche concrete collocano il contributo del designer all'interno degli SDG. Rispetto all'SDG 9, incentrato su innovazione e infrastrutture materiali, il lavoro relazionale del progettista impone un

allargamento del campo: costruire infrastrutture immateriali, reti di fiducia interistituzionale, piattaforme di scambio cognitivo e dispositivi educativi (Barca, McCann and Rodríguez-Pose, 2012; Moulaert et alii, 2014). In relazione all'SDG 10 il designer che opera all'intersezione tra formazione e Terza Missione interviene sui dispositivi di partecipazione, riducendo le asimmetrie di accesso all'innovazione che gravano sui territori marginali e sul tessuto microimprenditoriale e accrescendo la capacità collettiva di immaginare e governare il cambiamento (Gaiardo et alii, 2022).

L'orizzonte del contributo non si esaurisce tuttavia negli SDG 9 e 10: l'esperienza osservata apre connessioni con altri tre obiettivi dell'Agenda 2030. L'SDG 4 (Istruzione di qualità) è implicito nella natura formativa dei dispositivi discussi, che eccedono la didattica curriculare, coinvolgendo studenti, docenti e partner territoriali in processi di apprendimento cumulativo. L'SDG 11 (Città e comunità sostenibili) trova riscontro nell'orientamento delle pratiche verso laboratori civici, coesione comunitaria e riappropriazione del patrimonio. L'SDG 17 (Partnership per gli obiettivi) costituisce la cornice trasversale del modello: le alleanze durevoli fra Università, imprese, Enti pubblici e Terzo Settore sono condizione stessa di esistenza delle pratiche osservate. L'integrazione di questi obiettivi non è priva di tensioni. L'SDG 9, orientato all'innovazione industriale, può entrare in conflitto con l'SDG 10 quando l'innovazione tecnologica privilegia attori già strutturati, amplificando le asimmetrie. Analogamente l'SDG 11 può rafforzare dinamiche centripete a favore dei contesti urbani infrastrutturati a scapito dei territori interni. Anche l'SDG 17, se non governato da criteri di reciprocità e continuità, rischia di generare una moltiplicazione estrattiva di collaborazioni episodiche. Il Design come infrastruttura relazionale si gioca proprio nella capacità di rendere visibili e negoziabili queste tensioni.

Riflessioni conclusive per un possibile design come ipotesi critica | L'analisi dell'osservatorio D&T mostra la fragilità epistemologica di ogni tentativo di codificare l'innovazione territoriale attraverso modelli operativi rigidi. Il saggio non propone soluzioni replicabili, ma osserva una costellazione di alleanze inedite in cui emerge la prospettiva di una possibile Scuola di Design: un'accademia situata, capace di attivare conoscenza attraverso l'interazione fra progettisti, luoghi e comunità.

Il perimetro di trasferibilità del contributo si articola su tre livelli: il primo riguarda i limiti del saggio: D&T è assunta come caso strumentale per formulare un'ipotesi teorica, non come campione rappresentativo, con un valore euristico qualitativo e interpretativo; il secondo concerne le barriere strutturali alla replicabilità dei singoli progetti, dipendenti da condizioni locali – tessuto produttivo, fondi, interlocutori, politiche regionali – non riproducibili altrove; il terzo livello, effettivamente trasferibile, è il principio interpretativo poiché il Design come infrastruttura relazionale costituisce una cornice generalizzabile ad altri sistemi universitari, territori e scale di intervento. È questo il livello, non i casi, a legittimare il dialogo con le esperienze internazionali discusse. Occorre pertanto esplicitare il perimetro di trasferibilità del contributo, articolato in tre livelli.

Il primo riguarda i limiti del saggio: la rassegna D&T è assunta come caso strumentale per formulare un'ipotesi teorica, non come campione rappresentativo del sistema universitario italiano di Design; le evidenze discusse intendono restituirne il valore euristico entro un disegno di ricerca qualitativo e interpretativo.

Il secondo riguarda le barriere strutturali alla replicabilità dei singoli progetti, generati in condizioni specifiche – natura del tessuto produttivo locale, disponibilità di fondi di ricerca, presenza di interlocutori territoriali, orientamento delle politiche regionali – che non si ripropongono identicamente altrove.

Il terzo livello, che il contributo rivendica come effettivamente trasferibile, riguarda il principio interpretativo: la lettura del Design come infrastruttura relazionale costituisce una cornice generalizzabile ad altri sistemi universitari, territori e scale di intervento; è questo livello, non quello dei casi, a giustificare il dialogo con le esperienze internazionali discusse nel quadro comparativo.

Un primo ordine di risultati emerge dall'analisi longitudinale della rassegna D&T. L'osservatorio ha mostrato una trasformazione documentabile sia nella composizione dei partner – dalla prevalenza del comparto manifatturiero tradizionale a un ecosistema più articolato che include Enti pubblici, fondazioni e soggetti del terzo settore – sia nelle aree disciplinari prevalenti, oggi spostate verso il design dei servizi e della comunicazione sistemica. Il dato più rilevante non risiede però nella misurazione quantitativa di tale trasformazione bensì nel riconoscimento che essa restituisce: l'immagine di un Design che ha assunto, de facto, una funzione infrastrutturale.

Un secondo ordine di risultati riguarda dimensioni che sfuggono ai sistemi di valutazione quantitativa attualmente adottati. I progetti esposti nei cataloghi di D&T lo dimostrano: l'innovazione territoriale viene prodotta e soprattutto compresa nelle sue ricadute sociali quando a operare è un designer che si fa carico della cura del progetto, indipendentemente dalla natura formale dell'esito – artefatto fisico, strategia di servizio o identità visiva. Si tratta di dimensioni – fiducia, continuità relazionale, apprendimento cumulativo, capacità di mediazione – che non trovano riscontro negli indicatori VQR o REF[13] e che rischiano di essere sistematicamente marginalizzate. Senza il riconoscimento di questo presidio il progetto rischia di ridursi, per riprendere il pensiero di Gui Bonsiepe (1995), a una decorazione travestita da innovazione.

Un terzo ordine di riflessione riguarda le condizioni istituzionali che rendono possibile la sedimentazione di tali pratiche. Perché il Design possa operare come infrastruttura relazionale, occorre che il sistema universitario riconosca formalmente la didattica trasformativa e la terza missione ad alta intensità relazionale nei criteri di valutazione accademica, riequilibrando il peso oggi sbilanciato verso la produzione scientifica tradizionale. Occorre inoltre una stabilizzazione dei rapporti tra Università e partner territoriali che vada oltre la durata dei singoli finanziamenti di ricerca. In questa cornice l'ibridazione tra saperi universitari e manifatturieri diventa proposta culturale sostenibile: l'impresa, esposta allo sguardo laterale delle nuove generazioni, si apre al dubbio e alla riflessione critica, mentre gli studenti assumono un'autentica capacità di azione come co-creatori del sapere, nel senso che Hooks (1994) attribuisce all'educazione come pratica della libertà.

Il designer – spogliato da ogni retorica salvifica – non risolve la complessità del reale: costruisce

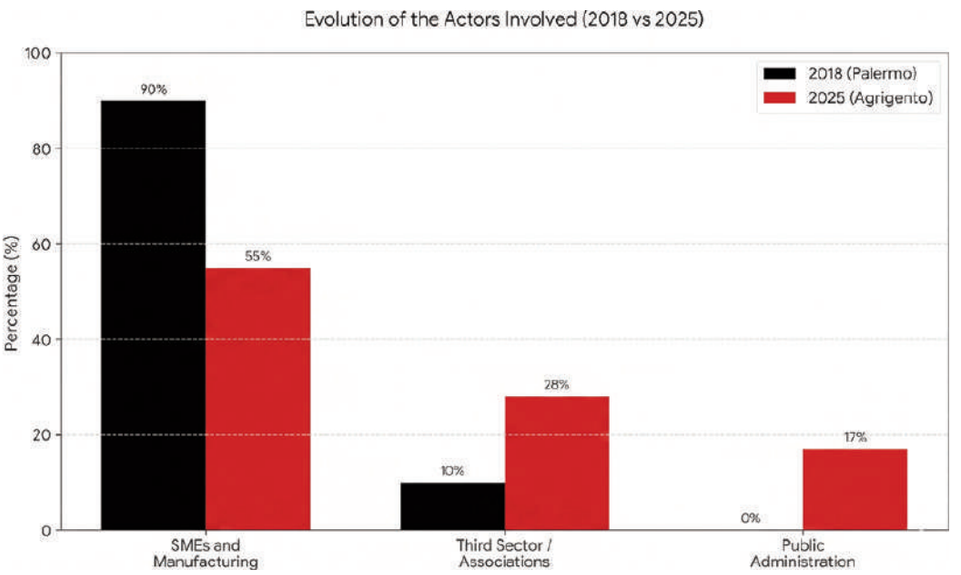


Fig. 5 | Evolution of the actors involved (credit: C. Marino, 2026).



Fig. 6 | Collaboration project with Fondazione Val di Seren ONLUS, in which exhibit and interaction design operate as devices for collective identity activation and for the reappropriation of local heritage, curated by 'Iuav' University of Venice (credit: 'Iuav' University of Venice, 2025).

l'infrastruttura abilitante per abitarla. Nonostante i vincoli sistemici della burocrazia e la perdurante precarietà della ricerca le pratiche osservate dimostrano che un'alleanza trasformativa tra Università e società è già una realtà in costruzione. Riconoscere il Design come visione strategica significa riconoscerne la capacità di incidere sul quotidiano, di rendere leggibili le complessità e di costruire, nel tempo, nuove possibilità di senso per i territori e le comunità che li abitano. Solo attraverso questa riconfigurazione del progetto come infrastruttura educativa e relazionale sarà possibile sottrarre gli SDG 9 e 10 alla retorica della mera prestazione tecnologica, per restituirli alla loro vocazione più autentica: la costruzione di un'equità reale, radicata nei luoghi e condivisa dalle comunità.

The United Nations 2030 Agenda (UN, 2015) has brought the relationship between innovation, infrastructure, and the reduction of inequalities back to the centre of the debate, with particular reference to Sustainable Development Goals (SDGs) 9 and 10. More than a decade after its adoption, however, an epistemic problem persists: territorial innovation is framed almost exclusively through technological, productive, and institutional parameters, while cultural, educational, and relational dimensions remain systematically marginal (Manzini, 2015; Sennett, 2018; Moulaert et alii, 2014). Detached from its educational and relational premises, territorial development turns into top-down interventions that are unable to support the social substratum: the result is an episodic and extractive model, lacking cognitive sedimentation (Torre, 2025), which disperses local forms of capital and amplifies the disparities in access to innovation that SDG 10 seeks to reduce. This critical issue is most acute in historically marginalised contexts, where any intervention without relational anchoring risks reproducing dynamics of dependence (Cassano, 2005; Barca, McCann and Rodríguez-Pose, 2012).

A corresponding narrowing occurs in design culture; Design is still interpreted through a functionalist and instrumental logic, as the linear resolution of problems or the optimisation of production processes: this reading separates design from its historical, symbolic, and political depth, inhibiting its transformative nature (Manzini, 2018; Irwin, 2015) and weakening its systemic vocation in the face of the complexity of contemporary transitions (Gaiardo et alii, 2022). The interpretative framework proposed here is situated within a reflection on complexity as a structural condition – etymologically, a 'being together' – and on the need for integrated tools for knowledge, design, and management (Sposito and Scalisi, 2024): within this horizon, reading Design as relational infrastructure means proposing a specific methodological device for addressing territorial complexity without reducing it to sectoral parameters.

The originality of the contribution therefore lies in reading Design as a relational infrastructure that has a structural effect on territorial innovation, moving beyond the reductive view of mere knowledge transfer to the productive systems. The Third Mission thus becomes a strategic space of mediation between universities, enterprises, and local communities, configured as a generative field of cognitive continuity, shared responsibility, and collective learning.

Three objectives follow from this position: to construct the conceptual framework of the theoretical hypothesis; to test it through the longitudinal analysis of the Design&Territori exhibition and conference series (2018-2025), taken as an observatory of the design practices developed by Italian university-based Design programmes; and to position it within an international and national reference framework capable of clarifying its operational specificity. The text is organised into six sections, moving from the conceptual framework to the con-

cluding reflections, through the empirical observatory, the discussion of structural limits, the comparative framework, and the role of design in relation to the Sustainable Development Goals. The result is a contribution positioned at the intersection between 'design studies' oriented towards territorial practices, 'innovation studies' attentive to the relational dimension of local development, and studies on the university Third Mission, within a framework that assumes complexity as an intrinsic condition of design and of knowledge concerning the built environment.

Design, education, and cultural infrastructures: a critical framework | The starting point is a problem of disciplinary status: to speak of Design means engaging with a discipline that has historically escaped unequivocal definitions, having been described over time as a method, language, process, and system of competences[1] (De Fusco, 1985). This definitional instability is far from being a limitation, as it reflects design's ability to adapt to different contexts and to assume differentiated cognitive, critical, and operational functions. Repositioning Design as a cultural device means shifting the centre of gravity from design understood as a response to a given demand to design as an interpretative act, a construction of narratives, and a production of shared knowledge. This shift has profound consequences at both theoretical and operational levels and is increasingly reflected in the international literature on 'transition design' (Irwin, 2015; Escobar, 2018).

This repositioning becomes particularly urgent when design engages with territories; places are not simply geographical containers but historical, symbolic, and relational constructions, the result of material and immaterial stratifications, local economies, shared memories, and often conflicting narratives. Design is therefore called upon to engage with territories, recognising that a holistic knowledge of the natural, social, and cultural components of a context is a necessary condition for designing innovation in a genuinely transformative way (Tamborrini and Stabellini, 2018; Barca, McCann and Rodríguez-Pose, 2012).

The approaches of Design for Territories[2] (Parente and Sedini, 2017) and Place Design[3] (Braunerhielm, 2025) converge on this point: territory should be understood as a field of interaction in which Design operates as an interpretative practice, a device capable of making latent relations visible and translating complexity into intelligible forms. The crucial conceptual shift is from designing for places to designing with people and places (Manzini, 2015; Braunerhielm, 2025); this shift structurally implies relationality, participation, and local embeddedness (Escobar, 2018).

The narrative and metaphorical dimension of design has a precise epistemic status: it produces representations that make it possible to explore complex problems[4] (Cross, 2006; Visser, 2006), to connect memory, the present, and future visions, and to activate transversal connections without imposing univocal solutions; it also supports the sedimentation of cultural capital capable of addressing complexity without reducing it to simplified schemes. In this process, the theme of trust assumes structural relevance, understood as an enabling condition for cooperation and for the construction of shared visions[5] (Putnam, Leonardi and Nanetti, 1993; Putnam, 2000): in complex territorial

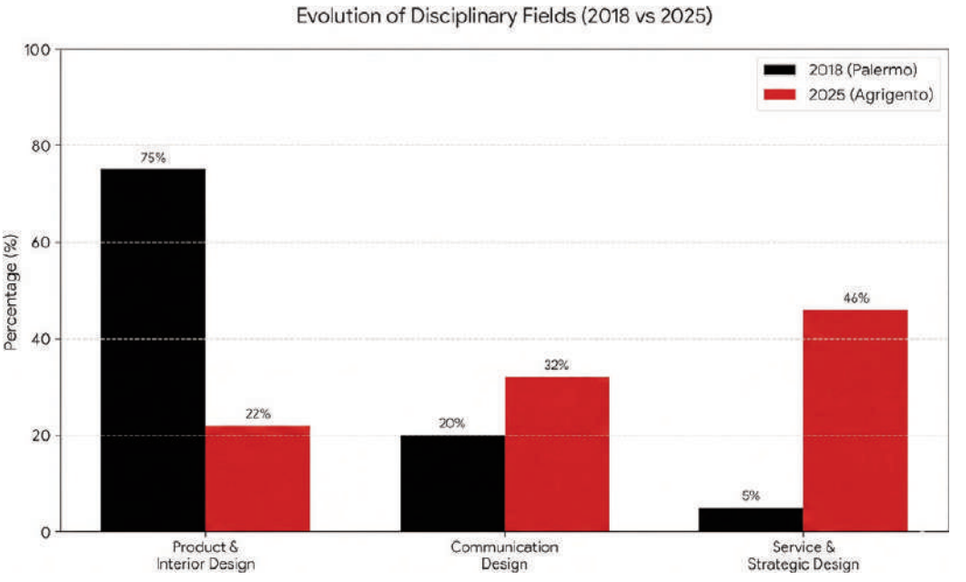


Fig. 7 | Evolution of disciplinary fields (credit: C. Marino, 2026).

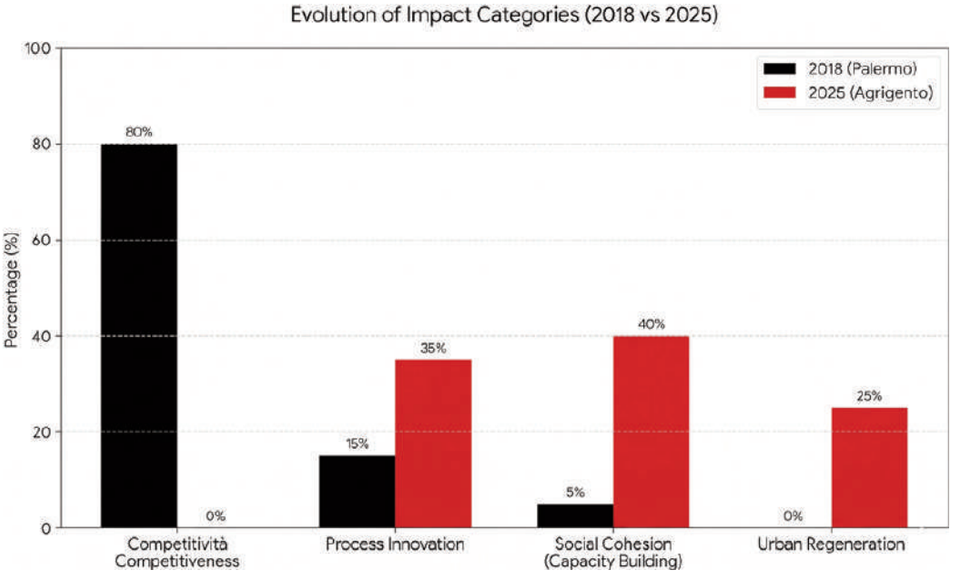


Fig. 8 | Evolution of impact categories (credit: C. Marino, 2026).



Fig. 9 | Communication design as systemic infrastructure, Design&Territori 2025 edition. The Rete Tetide visual identity project for the natural parks of Apulia exemplifies the move beyond branding as a merely aesthetic exercise: the construction of a modular visual system acts as a device for unifying the territory, supporting local economies, and promoting environmental education (credit: 'Sapienza' University of Rome, 2025).

contexts, design has the specific task of creating and maintaining the conditions that allow relations, expectations, and responsibilities to be negotiated over time (Bistagnino, 2016).

Education is the terrain on which this conception of design is tested in its most concrete implications; here, the 'sustainability of educational processes' within local development processes should not be confused with the delivery of technical upskilling programmes, because this would risk reducing education to training that is subordinate to market needs. Such a dynamic, documented with growing concern in the Italian academic debate and confirmed by similar trends in European and North American contexts (Loorbach and Wittmayer, 2023), expresses a structurally conservative demand, seeking 'immediately operational' profiles and relegating the designer to a role of technical execution. This reveals a marked unwillingness to invest in field-based education, as highlighted in the chapter 'Il design corre più veloce del suo riconoscimento?' of the Design Economy 2026 Report (Fondazione Symbola et alii, 2026).

The effective sustainability of educational processes is achieved when the expansion of knowledge is structured as a 'soft' infrastructure, understood as a set of relational, cognitive, and organisational conditions that make possible the continuity and sedimentation of innovation processes over time. In this framework, the University ceases to be a provider of standardised services and becomes a node of experimentation rooted in territories, a space in which knowledge is produced through interaction between disciplines, institutions, and communities (Petersen, Kruss and van Rheede, 2022), configuring the academic environment as a 'soft' infrastructure oriented towards the sustainability of complex systems and multidisciplinary research (Langella, Russo and Scalisi, 2024).

At the intersection between design and education, Design reveals its deepest matrix, namely a practice of emancipation, in the sense that Bell Hooks (1994) attributes to education as the practice of freedom. Without rooted educational and relational infrastructures, the event of innovation remains disconnected from the social fabric that should receive it, elaborate it, and reproduce it over time. A project separated from its historical and symbolic depth loses the ability to engage with territory as a horizon of meaning: innovation is exhausted at the moment of its manifestation, without leaving structural traces in the contexts that host it.

The critical observatory of university-based design practices as indicators | To test the thesis that frames design as relational infrastructure, the essay adopts an investigative perspective based on the longitudinal analysis of a broad set of applied experiences. The corpus of design practices collected in the two editions of the D&T exhibition and conference series – from Palermo 2018 to Agrigento 2025 (Fig. 1; Pasca, Russo and Tamborrini, 2018; Russo and Tamborrini, 2019; Benincasa, Russo and Tamborrini, 2025) – is taken as an epistemic device. The two catalogues function as a privileged observatory for reading the evolutionary dynamics in the relationship between university centres, the productive fabric, and local communities.

The analysed corpus comprises 150 projects, developed by 18 university centres in collaboration with more than 70 territorial partners, including small and medium-sized enterprises, public administrations, and Third Sector organisations. The breadth of the sample makes it possible to compare the evolutionary trajectories of design practices, not as replicable models, but as indicators of a progressive change in the role of university-based Design in relation to territorial innovation pro-

cesses. Methodologically, the analysis is based on a thematic coding of the project descriptions published in the catalogues, integrated with a typological classification of the partners involved and of the declared territorial impacts. The interpretative categories were constructed inductively from the data and subsequently validated through cross-comparison between the two editions, in order to ensure analytical coherence and diachronic comparability. The contribution is therefore configured as a theoretical-empirical comparative study, based on a longitudinal qualitative analysis of documented practices. The aim is not to develop a prescriptive taxonomy, nor to propose universally transferable models, but to identify recurrent dynamics and structural tensions capable of illuminating the role of university-based Design in territorial contexts: the corpus acts as an interpretative device that makes it possible to read the transformations under way against a non-linear interpretative grain.

In a context in which the history of the Italian Mezzogiorno has long been interpreted through a rigid dichotomy between centre and periphery (Cassano, 2005), the set of practices analysed contributes to outlining a counter-narrative, showing how marginal territories can be configured as fields of design experimentation and situated innovation, thereby escaping a linear view of progress (De Fusco and Rusciano, 2015; Russo, 2020): design acts as a relational practice capable of making visible plural trajectories of modernity rooted in specific contexts. From the diachronic comparison between the 2018 and 2025 editions, a structural shift emerges in the design paradigm.

In 2018, the prevailing orientation of partnerships was strongly concentrated in the traditional manufacturing sector (furniture, fashion, automotive, and food; Fig. 2), with the declared objective of raising quality standards for market competitiveness. The dominant disciplines – product, interior, and materials design – reflected this approach, configuring a model centred on the optimisation of material outcomes and on the performance of the object (Figg. 3, 4); in this phase, territorial impact was mediated almost exclusively by the productive dimension.

By 2025, the picture had changed significantly; while the role of small and medium-sized enterprises and craft districts remained central (55%), the presence of new interlocutors had consolidated (Fig. 5): Third Sector organisations (28%) and local public administrations (17%). This redistribution signals a redefinition of the perimeter of design action, which extends beyond the logic of the production chain to involve institutional and community actors in social innovation processes, as in the COmeta project (Arquilla and Caruso, 2025) or in recent mappings of the transformation trajectories of circular production systems and informal education (Franzo, Quartu and Tufarelli, 2025). A significant example is the collaboration with Fondazione Val di Seren ONLUS, in which exhibit and interaction design operate as devices for collective identity activation and for the reappropriation of local heritage (Fig. 6).

At the same time, a redefinition of the prevailing disciplinary areas can be observed; the design outcomes of 2025 (Fig. 7) fall predominantly within Service Design and Strategic Design (46%), followed by Communication Design (32%) and Product Design (22%). Even when the formal outcome takes the form of a physical artefact or travelling exhibition, the object is conceived as a node within a broader relational and ecosystemic system, and this transformation is also reflected in the territorial impacts of the projects.

The analysis classified the outcomes into three macro-categories: community capability-building and social cohesion (40%), where Design acts as a facilitator for vulnerable groups or marginalised communities; organisational and process innovation for local supply chains (35%), oriented towards the transition to circular economy models, in which design acts as a device for weaving territorial micro-networks (Gaddi and Mastrolonardo, 2024); and urban regeneration and heritage enhancement (25%), through territorial branding practices and hybrid museum pathways (Fig. 8). This perspective also includes the Rete Tetide visual identity project for the natural parks of Apulia (Fig. 9), in which Communication Design acts as a systemic infrastructure capable of coordinating territories, supporting local economies, and promoting environmental education through a modular visual system (Fig. 10).

The comparative reading highlights significant structural tensions: the intensification of the relational and systemic dimension makes the fragility of the conditions that sustain such practices more visible; collaboration between universities and enterprises can take the form of functional subsidiarity, with the risk of reducing design to the provision of low-cost services; many experiences generate significant cognitive and relational capital, but struggle to consolidate as stable infrastructures when the teaching device or short-term funding that made them possible comes to an end. This gap between design intensity and structural weakness is one of the central tensions of contemporary territorial innovation and provides the starting point for the analysis of recurrent dynamics and structural constraints that affect the stability of processes over time.

Recurring dynamics and structural limits: when innovation does not sediment | Consistently with the previous discussion, analytical attention must shift from the formal outcomes of individual projects to the structural conditions that make possible – or, conversely, hinder – the sedimentation of innovation in local contexts. The problematic node lies in the complex ecosystem of regulatory and economic conditions that confines design practices to a purely episodic dimension.

When innovation does not sediment, there is a systematic dispersion of cognitive and relational capital, and the enabling infrastructure fails in its task. Structural limits emerge particularly in marginal contexts, such as those of the Mezzogiorno, where design engages with historical discontinuities and rooted fragilities; in these contexts, Design risks being reduced to an instrument of simplification and homogenisation whenever it loses its situated character and its capacity to assume territory as a horizon of meaning within which to establish a conscious and durable dialogue.

Observing the operational dynamics across territories, a first recurrent indicator is the strategic centrality of intermediate devices – collaborative platforms, civic laboratories, teaching incubators, and applied research centres – that operate as 'porous' interfaces between the institutional rigidity of the University, the demands of the productive fabric, and the needs of citizens, as shown by experiments on proximity-based collaborative districts (Crippa et alii, 2024). Their usefulness is, however, counterbalanced by an intrinsic fragility: almost always tied to fixed-term funding, short-cycle competitive calls, or the voluntary initiatives of individual researchers, these devices struggle to become stably institutionalised.

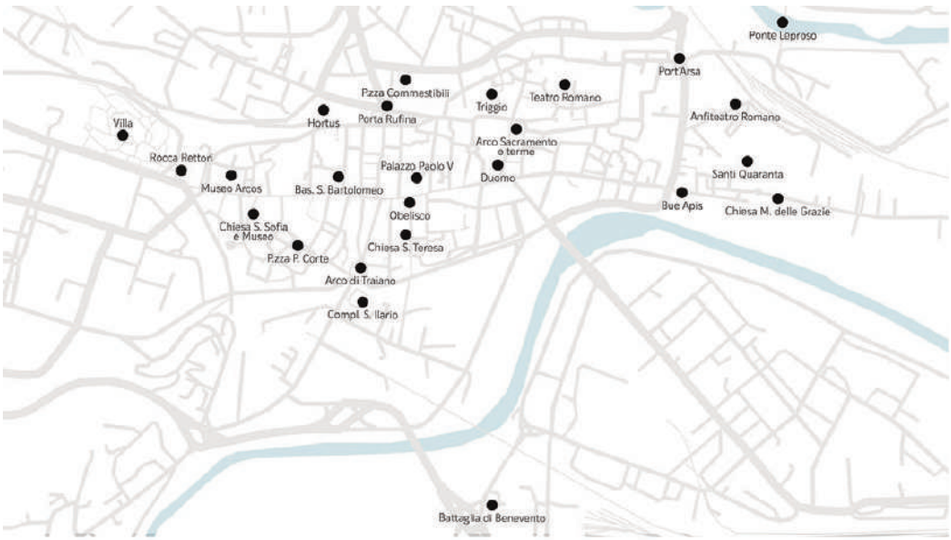
A similar instability characterises interinstitutional networks, whose durability is constantly threatened by systemic limits. In the field of public policy, there is an urgent need to move beyond fragmented and sectoral interventions[6] (Mortati et alii, 2016) and to invest consistently in visions capable of orienting territorial transformations over time, permanently strengthening competences, relations, and forms of mediation between different actors.

Within this horizon, design should organically assume a function of facilitation and mediation, reducing the weight of purely prescriptive logics and of a rigid bureaucratic control that instead continues to act as a powerful device of friction, obstructing, slowing down, and sometimes inhibiting the collaborative dynamics that, by their very nature, require high levels of agility and flexibility.

Added to this regulatory limit is the impact of 'academic precarity': most field-based research practices – especially those closest to marginal communities – are carried out by young researchers whose contractual discontinuity translates into a discontinuity of presence in the territory, severing the bonds of trust that constitute the foundation of soft infrastructure[7] (Petersen, Kruss and van Rheede, 2022; Loorbach and Wittmayer, 2023; Ferreira and Quesado Delgado, 2024). The relational dimension of design, and in particular the theme of trust as an enabling condition for cooperation and the construction of shared visions (Putnam, Leonardi and Nanetti, 1993; Putnam, 2000), depends on a temporal continuity that the structural intermittence of the academic workforce systematically undermines.

The third structural limit concerns the lack of institutional recognition for transformative teaching and for Third Mission practices with high relational intensity. Academic evaluation systems continue to reward predominantly bibliometric production measured through standardised indicators, often indifferent to territorial impacts and to processes of relational capital-building; on the teaching side, evaluation criteria are flattened onto parameters of quantitative efficiency – number of graduates and regularity of time-to-degree – neglecting the quality and depth of field-based educational experience. This produces a systemic misalignment between what generates territorial value in the medium to long term and what is actually rewarded in university career and funding mechanisms.

Design practices that operate as relational infrastructures – slow, cumulative, and based on the construction of trust and continuity – are structurally disadvantaged in comparison with faster, individualised, and easily quantifiable research models; consequently, the commitment invested in the Third Mission is progressively marginalised, downgraded, and relegated to a merely episodic administrative obligation. Yet, in the face of a labour market increasingly oriented towards executive logics



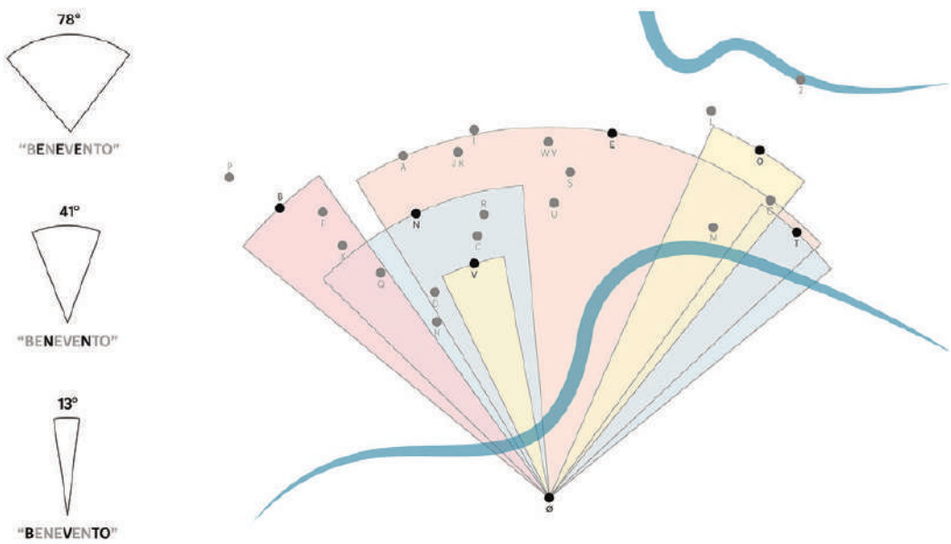














Fig. 10 | Communication design as systemic infrastructure, Design&Territori 2025 edition: the visual identity project based on a dynamic place-branding strategy (credit: D. Galieri, 2025).

(Fondazione Symbola et alii, 2026), the Third Mission is precisely the privileged place in which Design can operate as an infrastructural practice, restoring agency to territories and constructing cognitive and relational continuity: until care for contexts and mediation work receive structural recognition, territorial innovation will remain the exceptional outcome of dispersed individual efforts, unable to sediment as a stable infrastructure.

An international and national reference framework | To position the D&T experience within a comparable framework, international and national initiatives were identified on the basis of four criteria: 1) the presence of universities as nodes in the network; 2) structured and continuous relations with non-academic territorial partners; 3) the production of design artefacts, rather than theoretical elaboration alone; and 4) a multi-year duration. The selection led to three international cases – DESIS Network, AHRC Design Exchange Partnerships, and Design Factory Global Network – and to one national comparison case, the system of ADI Territorial Delegations.

The DESIS Network[8] – Design for Social Innovation towards Sustainability – is an international academic network founded in 2009 by Ezio Manzini and formally established as a non-profit association in 2014. It brings together sixty-eight design laboratories in thirty-two countries, based at design schools and universities. DESIS Labs interact through coordinated thematic programmes and work with local, regional, and global partners to orient research and teaching towards social innovation practices, configuring a bottom-up network model in which the global scale is sustained without weakening the local radicality of projects (Manzini, 2015).

The Design Exchange Partnerships constitute the operational core of Future Observatory – Design the Green Transition, a public programme promoted by the British Arts and Humanities Research Council in partnership with the Design Museum in London. With an investment of fifty-nine million pounds, the Design Exchange Partnerships connect more than one hundred higher education institutions with around seventy-five territorial partners in short-term triangular projects oriented towards applied outcomes in the ecological transition. The model is top-down, coordinated by a national research policy.[9]

The Design Factory Global Network, active since 2011 with its initial hub at Aalto University (Finland) and now composed of more than thirty-five members across five continents, is a network of innovation hubs hosted by universities and research institutions; each Design Factory operates as a co-creation platform between academic research, students, and industry, developing products, services, and prototypes with territorial partners. The case of Design Factory Aveiro – integrated within the Creative Science Park of the Aveiro region and connected to the Institute ID+ of the University of Aveiro – exemplifies a model in which design mediates between academia and the local economic fabric (Design Factory Global Network, 2024).[10]

At national level, the system of the thirteen Territorial Delegations of the Associazione per il Disegno Industriale (ADI) – founded in 1956 and organised around the Compasso d'Oro Award – constitutes the most widespread infrastructure for the territorial embeddedness of design culture in Italy. The Delegations carry out functions of local scouting, pre-selection of nominations for the Award, and cultural promotion. Their acknowledged limitation, however, is that they operate mainly within a logic of recognition and reward for existing projects, without directly generating continuous design processes within territories.[11]

The comparison with the selected cases places D&T in a strategic position. The three international references exemplify different models – a bottom-up academic network, a top-down public programme, and an inter-academic network with an industrial vocation – united by the capacity to produce design artefacts through structured relations with territorial partners. The national case of ADI, while representing the most consolidated infrastructure for the territorial embeddedness of Italian design, operates mainly within an ex post logic of recognition: it records, selects, and rewards projects matured elsewhere but does not directly generate continuous design processes.

In relation to these references, the specificity of D&T lies in three convergent elements: it is a generative, rather than only reconnaissance-based, initiative, selecting and rewarding projects through a collaborative curatorial system and not merely through documentation; it is a direct expression of the Italian university-based Design system, rooted in eighteen national centres; and it operates with continuity through the exhibition and conference series as a periodic infrastructure of restitution and comparison. The point is not to claim the superiority of the model, but to identify an operational specificity – the combination of design production, national university embeddedness, and documented periodicity – that the compared cases, each for its own reasons, do not express simultaneously.

Design in territorial innovation processes | The dynamics emerging from the D&T observatory document a transformation already under way: the designer assumes the complexity of territorial innovation as an ordinary part of their work. Deprived of the coercive force of political decision-making, the designer operates as a facilitator: making latent relations visible, translating complexity into intelligible forms, and connecting local and global scales. The figure of the designer thus exceeds the technical dimension and is configured as a cultural and relational operator (Manzini, 2015, 2018; Irwin, 2015).

In this reading, the exhibition platform and the network of university laboratories function as a soft infrastructure: design becomes a device of convergence in which teaching, research, and enterprise mutually reinforce one another. Collaborative pathways become opportunities for bidirectional education: they prepare students to govern the complexity of real systems and offer territorial SMEs – often small and medium-sized enterprises excluded from the major circuits of innovation – an opportunity for cultural and strategic updating.

The University activates processes of reciprocal learning with the territorial ecosystem: although limited to the duration of a semester or an academic year, these collaborations weave intangible networks that generate continuity, memory, and trust well beyond the completion of the individual project[12] (Putnam, Leonardi and Nanetti, 1993; Putnam, 2000), sedimenting in enterprises a more mature awareness of the strategic value of Design and forming in future professionals a systemic-relational approach.

An exemplary historical case is the story of Alexander Hardcastle in the Valley of the Temples, where continuous action on heritage becomes an infrastructure and a device of community trust (Parello, 2008; Savatteri, 2025): the prolonged care of a place is exactly what Design, as an infrastructural practice, should produce in territories.

These concrete practices position the designer's contribution within the SDGs. With respect to SDG 9, centred on innovation and material infrastructures, the designer's relational work requires an expansion of the field: the construction of intangible infrastructures, networks of interinstitutional trust, platforms for cognitive exchange, and educational devices (Barca, McCann and Rodríguez-Pose, 2012; Moulaert et alii, 2014). In relation to SDG 10, the designer operating at the intersection between education and the Third Mission intervenes in participatory devices, reducing the asymmetries of access to innovation that affect marginal territories and the micro-enterprise fabric, and increasing the collective capacity to imagine and govern change (Gaiardo et alii, 2022).

The horizon of the contribution is not, however, exhausted by SDGs 9 and 10: the experience observed opens connections with three other objectives of the 2030 Agenda. SDG 4 (Quality Education) is implicit in the educational nature of the devices discussed, which exceed curricular teaching by involving students, lecturers, and territorial partners in cumulative learning processes. SDG 11 (Sustainable Cities and Communities) is reflected in the orientation of practices towards civic laboratories, community cohesion, and the reappropriation of heritage. SDG 17 (Partnerships for the Goals) constitutes the transversal framework of the model: durable alliances between universities, enterprises, public bodies, and the Third Sector are the very condition for the existence of the practices observed. The integration of these objectives is not free from tensions. SDG 9, oriented towards industrial innovation, may come into conflict with SDG 10 when technological innovation privileges already structured actors, amplifying asymmetries. Similarly, SDG 11 may reinforce centripetal dynamics in favour of well-infrastructured urban contexts at the expense of inland territories. SDG 17, too, unless governed by criteria of reciprocity and continuity, risks generating an extractive multiplication of episodic collaborations. The stakes of Design as relational infrastructure lie precisely in the capacity to make these tensions visible and negotiable.

Concluding reflections on design as a possible critical hypothesis | The analysis of the D&T observatory shows the epistemological fragility of any attempt to codify territorial innovation through rigid operational models. The essay does not propose replicable solutions, but observes a constellation of unprecedented alliances in which the prospect of a possible School of Design emerges: a situated academy capable of activating knowledge through the interaction between designers, places, and communities.

The transferability perimeter of the contribution is articulated on three levels: the first concerns the

limits of the essay: D&T is taken as an instrumental case for formulating a theoretical hypothesis, not as a representative sample, with a qualitative and interpretative heuristic value; the second concerns the structural barriers to the replicability of individual projects, which depend on local conditions – productive fabric, funds, interlocutors, and regional policies – that cannot be reproduced elsewhere; the third level, which is effectively transferable, is the interpretative principle, since Design as relational infrastructure constitutes a framework that can be generalised to other university systems, territories, and scales of intervention. It is this level, not the cases themselves, that legitimises dialogue with the international experiences discussed. It is therefore necessary to make explicit the transferability perimeter of the contribution, articulated on three levels.

The first concerns the limits of the essay: the D&T exhibition and conference series is taken as an instrumental case for formulating a theoretical hypothesis, not as a representative sample of the Italian university-based Design system; the evidence discussed is intended to demonstrate its heuristic value within a qualitative and interpretative research design.

The second concerns the structural barriers to the replicability of individual projects, generated under specific conditions – the nature of the local productive fabric, the availability of research funds, the presence of territorial interlocutors, and the orientation of regional policies – that do not recur identically elsewhere.

The third level, which the contribution claims as effectively transferable, concerns the interpretative principle: reading Design as relational infrastructure constitutes a framework that can be generalised to other university systems, territories, and scales of intervention; it is this level, rather than that of the cases, that justifies the dialogue with the international experiences discussed in the comparative framework.

A first order of results emerges from the longitudinal analysis of the D&T exhibition and conference series. The observatory has shown a documentable transformation both in the composition of partners – from the prevalence of the traditional manufacturing sector to a more articulated ecosystem that includes public bodies, foundations, and Third Sector actors – and in the prevailing disciplinary areas, which have now shifted towards service design and systemic communication design. The most relevant finding, however, does not lie in the quantitative measurement of this transformation, but in the recognition it provides: the image of a Design that has assumed, de facto, an infrastructural function.

A second order of results concerns dimensions that escape the quantitative evaluation systems currently adopted. The projects exhibited in the D&T catalogues demonstrate this: territorial innovation is produced and, above all, understood in its social impacts when the designer takes responsibility for the stewardship of the project, regardless of the formal nature of the outcome – physical artefact, service strategy, or visual identity. These are dimensions – trust, relational continuity, cumulative learning, and mediation capacity – that are not reflected in VQR or REF[13] indicators and risk being systematically marginalised. Without recognition of this form of stewardship, design risks being reduced, to take up Bonsiepe's (1995) thought, to decoration disguised as innovation.

A third order of reflection concerns the institutional conditions that make the sedimentation of these practices possible. For Design to operate as a relational infrastructure, the university system must formally recognise transformative teaching and the Third Mission with high relational intensity within academic evaluation criteria, rebalancing the weight currently skewed towards traditional scientific production. The relationships between universities and territorial partners must also be stabilised beyond the duration of individual research grants. Within this framework, the hybridisation of university and manufacturing knowledge becomes a sustainable cultural proposal: the enterprise, exposed to the critical gaze of new generations, opens itself to doubt and critical reflection, while students assume genuine agency for action as co-creators of knowledge, in the sense that Hooks (1994) attributes to education as the practice of freedom.

The designer – stripped of any salvific rhetoric – does not resolve the complexity of reality: they construct the enabling infrastructure for inhabiting it. Despite the systemic constraints of bureaucracy and the persistent precarity of research, the practices observed demonstrate that a transformative alliance between universities and society is already a reality under construction. Recognising Design as a strategic vision means recognising its capacity to affect everyday life, to make complexity legible, and to construct, over time, new possibilities of meaning for territories and the communities that inhabit them. Only through this reconfiguration of design as an educational and relational infrastructure will it be possible to free SDGs 9 and 10 from the rhetoric of mere technological performance and to return them to their most authentic vocation: the construction of real equity, rooted in places and shared by communities.

Acknowledgements

The contribution is the outcome of a shared reflection by the Authors. However, the Introduction and 'Design, education, and cultural infrastructures: a critical framework' are attributable to D. Russo; 'Design in territorial innovation processes' and 'Concluding reflections on design as a possible critical hypothesis' are attributable to P. Tamborrini; 'The critical observatory of university-based design practices as indicators', 'Recurring dynamics and structural limits: when innovation does not sediment', and 'An international and national reference framework' are attributable to C. Marino.

Notes

1) The impossibility of defining Design unequivocally once and for all was highlighted by Renato De Fusco (1985) in his now classic Storia del Design. For De Fusco, Design cannot be defined in an essential sense, but can be understood through its phenomenology, based on the co-presence of four decisive factors: design, production, sales, and consumption. This is the well-known four-leaf clover theory, understood as a historiographical device that allows for a coherent selection of themes and design cases through which to reconstruct the historical development of design, from movable-type printing – considered an ante litteram case of industrial design – up to the 1980s.

2) Design for Territories, as an emerging field of research, proposes a first theoretical systematisation of the field, distinguishing it from sectoral or merely applicative approaches.

3) In the international debate, the emergence of approaches that relate design and territory is accompanied by a plurality of denominations and theoretical frameworks, reflecting the heterogeneous and non-canonised nature of this field of research. Alongside Design for Territories, expressions such as 'territorial design', 'place-based design', and 'design for local development' are encountered, often used to emphasise specific aspects of the relationship between design, local contexts, and development policies. This terminological plurality makes it possible to address territory as a historical and relational construction, avoiding disciplinary reductions or universalising models.

4) This conception of design as a practice of facilitation finds an explicit formulation in the work of Ezio Manzini, who reflects on the changing role of the designer in co-design and social innovation processes. Manzini (2015, p. 69) observes that «[…] the specific role of design experts is to trigger and support large design processes by building the necessary coalitions among different partners; to analyze existing resources; and to enable the active participation of people who are immediately concerned». The designer is thus described as an actor capable of activating, sustaining, and orienting collective processes, while maintaining a specific cultural and design role within contexts characterised by a plurality of actors and forms of knowledge.

5) On design as a device of knowledge and as the construction of meaning over time, see several contributions that recognise design's specific epistemic and cultural value. Manzini (2015) interprets design as an open and shared process, oriented towards the construction of long-term visions and practices of social transformation. Cross (2006) recognises design as an autonomous form of knowledge production, based on its own cognitive modes, including the use of representations and metaphors. From a broader perspective, Sennett (2008, 2018) relates construction, temporality, and the experience of dwelling, offering a reading of the city as an open and unfinished process that is useful for understanding design as a practice that develops over time and through use. A related position, expressed in the Italian context at an earlier historical stage, is that of Enzo Mari (2011, p. 88), who explicitly links the meaning of design to its ability to produce knowledge, arguing that design is meaningful when it communicates knowledge. This reference reinforces a reading of design as an ethical and cognitive practice, without overlapping with more recent theoretical frameworks.

6) The concept of trust as an enabling condition for cooperation, participation, and the construction of relational networks in territorial contexts has an important foundation in the international literature on social capital. In particular, Robert D. Putnam's research (2000; Putnam, Leonardi and Nanetti, 1993) shows how trust, networks of civic participa-

tion, and norms of reciprocity constitute essential components of social capital, enabling communities to coordinate and collaborate effectively in collective dynamics and affecting the development and governance capacity of territories.

7) The international literature on transitions describes them as 'transformative spaces' capable of generating collective learning and situated experimentation, while at the same time being structurally exposed to the risk of partial institutionalisation or exhaustion once the project that generated them comes to an end (Loorbach and Wittmayer, 2023).

8) For more information on DESIS Network, see the webpage: desisnetwork.org/ [Accessed 17 April 2026].

9) For more information on AHRC – Arts and Humanities Research Council, see the webpage: ukri.org/what-we-do/browse-our-areas-of-investment-and-support/design-research/ [Accessed 17 April 2026].

10) For more information on Design Factory Global Network, see the webpage: dfgn.org/ [Accessed 17 April 2026].

11) For more information on ADI – Associazione per il Disegno Industriale, see the webpage: adi-design.org/ [Accessed 17 April 2026].

12) The political dimension of design, recalled in relation to participatory processes and to the construction of meaning in territorial contexts, has been the subject of an articulated theoretical reflection in recent years. In particular, Mortati et alii (2016) underline how the relationship between design and public policies implies a shift from a focus on the solution to the centrality of evaluation processes, highlighting the role of design in defining decision-making frameworks and the social effects of policies themselves. In a complementary perspective, Manzini (2018) interprets design as a practice capable of affecting the politics of everyday life, relating design, forms of life, and social transformation, and attributing to design an active role in the construction of shared and sustainable visions of contemporary living.

13) The measurement of Third Mission impact is the subject of a growing debate at European level. Evaluation systems such as the Italian VQR or the British REF privilege indicators of scientific productivity that rarely capture the territorial and social impacts of applied research work. Some scholars explicitly refer to a 'precarity paradox': public universities that adopt fixed-term contracts to maximise flexibility end up generating structural inefficiencies that compromise the productivity of research itself (Ferreira and Quesado Delgado, 2024), and even more so the continuity of the bonds of trust on which collaboration with territories depends.

References

Arquilla, V. and Caruso, C. (2025), "Un approccio di integrazione nativa dell'inclusione nel meta-design – L'esperienza COmeta | Towards native integration of inclusivity in meta-design – The COmeta experience", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 17, pp. 360-373. [Online] Available at: doi.org/10.69143/2464-9309/17252025 [Accessed 10 April 2026].

Barca, F., McCann, P. and Rodríguez-Pose, A. (2012), "The Case for Regional Development Intervention – Place-based Versus Place-neutral Approaches", in *Journal of Regional Science*, vol. 52, issue 1, pp. 134-152. [Online] Available at: doi.org/10.1111/j.1467-9787.2011.00756.x [Accessed 10 April 2026].

Benincasa, A., Russo, D. and Tamborrini, P. (2025), *Design&Territori – Agrigento 2025*, Mimesis, Sesto San Giovanni.

Bistagnino, L. (2016), *microMACRO – Il complesso delle micro relazioni sistemiche genera il nuovo modello economico-produttivo*, Edizioni Ambiente, Milano.

Bonsiepe, G. (1995), *Dall'oggetto all'interfaccia – Mutazioni del design*, Feltrinelli, Milano.

Braunerhielm, L. (2025), "Place Design – From Planning for Places to Designing with People and Places", in *Land*, vol. 14, issue 10, article 1941, pp. 1-19. [Online] Available at: doi.org/10.3390/land14101941 [Accessed 10 April 2026].

Cassano, F. (2005), *Il pensiero meridiano*, Laterza, Roma-Bari.

Crippa, D., Di Prete, B., Fagnoni, R. and Leonardi, C. (2024), "Distretti energetici collaborativi – Laboratori urbani per un'energia di prossimità | Collaborative energy districts – Urban workshops for proximity energy", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 15, pp. 296-305. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/15242024 [Accessed 10 April 2026].

Cross, N. (2006), *Designerly Ways of Knowing*, Springer, London. [Online] Available at: doi.org/10.1007/1-84628-301-9 [Accessed 10 April 2026].

De Fusco, R. (1985), *Storia del design*, Laterza, Roma-Bari.

De Fusco, R. and Rusciano, R. R. (2015), *Design e Mezzogiorno tra storia e metafora*, Progedit, Bari.

Escobar, A. (2018), *Designs for the Pluriverse – Radical Interdependence, Autonomy, and the Making of Worlds*, Duke University Press, Durham.

Ferreira, A. and Quesado Delgado, J. (2024), "The precarity paradox – The precarity-driven inefficiencies of research at a public university", in *Science and Public Policy*, vol. 51, issue 2, pp. 297-308. [Online] Available at: doi.org/10.1093/scipol/scad075 [Accessed 10 April 2026].

Fondazione Symbola, Deloitte Private, POLI.design and ADI (2026), *Design Economy 2026*, I Quaderni di Symbola, Roma. [Online] Available at: symbola.net/ricerca/design-economy-2026/ [Accessed 17 April 2026].

Franzo, P., Quartu, A. and Tufarelli, M. (2025), "Re-shaping fashion in Italy – Sistemi circolari, scenari phygital e formazione informale | Re-shaping fashion in Italy – Circular systems, phygital scenarios, and informal education", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 18, pp. 344-357. [Online] Available at: doi.org/10.69143/2464-9309/18212025 [Accessed 10 April 2026].

Gaddi, R. and Mastrolonardo, L. (2024), "Micro-reti locali per la transizione verde della filiera della lana | Local micro-networks for green transition of the wool supply chain", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 15, pp. 344-353. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/15292024 [Accessed 10 April 2026].

Gaiardo, A., Remondino, C., Stabellini, B. and Tamborrini, P. (2022), *Il design è innovazione sistemica – Metodi e strumenti per gestire in modo sostenibile la complessità contemporanea – Il caso Torino*, LetteraVentidue, Siracusa.

Hooks, B. (1994), *Teaching to Transgress – Education as the Practice of Freedom*, Routledge, New York.

Irwin, T. (2015), "Transition Design – A Proposal for a New Area of Design Practice, Study, and Research", in *Design and Culture | The Journal of the Design Studies Forum*, vol. 7, issue 2, pp. 229-246. [Online] Available at: doi.org/10.1080/17547075.2015.1051829 [Accessed 10 April 2026].

Langella, C. Russo, D. and Scalisi, F. (2024), "Design e Gastrofisica – Innovazione e sostenibilità dei sistemi alimentari multisensoriali | Design and Gastrophysics – Innovation and sustainability of multisensory food systems", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 16, pp. 250-277. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/16222024 [Accessed 10 April 2026].

Loorbach, D. A. and Wittmayer, J. (2023), "Transforming universities – Mobilizing research and education for sustainability transitions at Erasmus University Rotterdam, The Netherlands", in *Sustainability Science*, vol. 19, pp. 19-33. [Online] Available at: doi.org/10.1007/s11625-023-01335-y [Accessed 10 April 2026].

Manzini, E. (2018), *Politiche del quotidiano – Progetti di vita che cambiano il mondo*, Edizioni di Comunità, Roma.

Manzini, E. (2015), *Design, When Everybody Designs – An Introduction to Design for Social Innovation*, The MIT Press, Cambridge.

Mari, E. (2011), *25 modi di piantare un chiodo – Sessant'anni di idee e progetti per difendere un sogno*, Mondadori, Milano.

Mortati, M., Villari, B., Maffei, S. and Arquilla, V. (2016), *Le politiche per il design e il design per le politiche – Dal focus sulla soluzione alla centralità della valutazione*, Maggioli, Santarcangelo di Romagna.

Moulaert, F., MacCallum, D., Mehmood, A. and Hamdouch, A. (eds) (2014), *The International Handbook on Social Innovation – Collective Action, Social Learning and Transdisciplinary Research*, Edward Elgar, Cheltenham.

Parello, G. (ed.) (2008), *Alexander Hardcastle e la Valle dei Templi – Storia di un progetto visionario nella Sicilia del primo Novecento*, Soprintendenza BB.CC.AA. di Agrigento, Agrigento.

Parente, M. and Sedini, C. (2017), "Design for Territories as Practice and Theoretical Field of Study", in *The Design Journal | An International Journal for All Aspects of Design*, vol. 20, issue supp. 1, pp. S3047-S3058. [Online] Available at: doi.org/10.1080/14606925.2017.1352812 [Accessed 10 April 2026].

Pasca, V., Russo, D. and Tamborrini, P. (eds) (2018), *Design&Territori*, Aesthetica-Mimesis, Palermo-Milano. [Online] Available at: iris.unipa.it/retrieve/e3ad891d-db8c-da0e-e053-3705fe0a2b96/DR%20D%26T.pdf [Accessed 10 April 2026].

Petersen, I., Kruss, G. and van Rheede, N. (2022), "Strengthening the university third mission through building community capabilities alongside university capabilities", in *Science and Public Policy*, vol. 49, issue 6, pp. 890-904. [Online] Available at: doi.org/10.1093/scipol/scac036 [Accessed 10 April 2026].

Putnam, R. D. (2000), *Bowling Alone – The Collapse and Revival of American Community*, Simon & Schuster, New York.

Putnam, R. D., Leonardi, R. and Nanetti, R. Y. (1993), *Making Democracy Work – Civic Traditions in Modern Italy*, Princeton University Press, Princeton. [Online] Available at: doi.org/10.2307/j.ctt7s8r7 [Accessed 10 April 2026].

Russo, D. (2020), "Appunti sul design meridiano", in Russo, D., Bisson, M., Palmieri, S., Sessa, E., Carta, M., Cristallo, V., Carullo, R. and Labalestra, A. (eds), *Southern Identity – Notizie sul design meridiano*, Palermo University Press, Palermo, pp. 7-16. [Online] Available at: iris.unipa.it/handle/10447/531303 [Accessed 10 April 2026].

Russo, D. and Tamborrini, P. (eds) (2019), *Design&Territori – Università e aziende tra sperimentazione e innovazione, Palermo, Italy, November 2-3, 2018*, Palermo University Press, Palermo. [Online] Available at: hdl.handle.net/10447/352723 [Accessed 10 April 2026].

Savatteri, G. (2025), "Agrigento in cerca di autore", in *La capitale del Mito – Agrigento '25 – La scommessa della cultura*, GEDI, Torino, pp. 20-65.

Sennett, R. (2018), *Building and Dwelling – Ethics for the City*, Farrar, Straus and Giroux, New York.

Sennett, R. (2008), *The Craftsman*, Yale University Press, New Haven.

Sposito, C. and Scalisi, F. (2024), "Affrontare la Complessità – Conoscenza, progetto e gestione dell'ambiente costruito | Dealing with Complexity – Knowledge, design, and management of the built environment", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 16, pp. 2-15. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/1602024 [Accessed 10 April 2026].

Tamborrini, P. and Stabellini, B. (2018), "Metodologie e strumenti per l'innovazione sostenibile", in *MD Journal*, vol. 5, pp. 50-57. [Online] Available at: hdl.handle.net/11583/2713828 [Accessed 10 April 2026].

Torre, A. (2025), "Territorial development – Towards a dynamic and innovative understanding", in *Regional Studies*, vol. 59, issue 1, article 2465657, pp. 1-5. [Online] Available at: doi.org/10.1080/00343404.2025.2465657 [Accessed 10 April 2026].

UN – United Nations (2015), *Transforming our world – The 2030 Agenda for Sustainable Development – Resolution adopted by the General Assembly on 25 September 2015*, document A/RES/70/1. [Online] Available at: docs.un.org/en/A/res/70/1 [Accessed 10 April 2026].

Visser, W. (2006), "Designing as construction of representations – A dynamic viewpoint in cognitive design research", in *Human-Computer Interaction*, vol. 21, issue 1, pp. 103-152. [Online] Available at: doi.org/10.1207/s15327051hci2101_4 [Accessed 10 April 2026].

DESIGN
Essays & Viewpoint

AGATHÓN – International Journal of Architecture, Art and Design | n. 19 | 2026 | pp. 346-367
ISSN print: 2464-9309 – ISSN online: 2532-683X | doi.org/10.69143/2464-9309/19202026

Article Info

Received 10 March 2026
Revised 24 April 2026
Accepted 29 April 2026
Published 30 June 2026

CO-CREARE FUTURI SOSTENIBILI
Il MUSAE Factory model per un'innovazione con arte e tecnologia orientata agli SDG

CO-CREATING SUSTAINABLE FUTURES
The MUSAE Factory Model for SDG-oriented innovation through art and technology

Marita Canina, Tatiana Efremenko

Abstract

L'innovazione è centrale per l'avanzamento degli Obiettivi di Sviluppo Sostenibile e delle Agende europee, ma i modelli attuali faticano a confrontarsi con la complessità sistemica, i compromessi e le transizioni di lungo periodo. Il presente contributo illustra il progetto MUSAE e il suo Factory Model a codice aperto, un quadro operativo guidato dall'arte e orientato al futuro, coerente con il paradigma dell'Industria 5.0. Al suo centro si colloca il metodo Design Futures Art-driven (DFA), che integra analisi delle tendenze, visione, ideazione e prototipazione, combinando sperimentazione artistica, design, sviluppo tecnologico e co-creazione con l'intelligenza artificiale. Testato in residenze caratterizzate dalla presenza di arte e tecnologia nel contesto del 'cibo come medicina', MUSAE dimostra come visioni condivise del futuro possano generare prototipi fino al TRL5 e favorire sinergie sistemiche. Il modello interpreta l'SDG 9 come abilitatore di un'innovazione integrata, centrata sull'uomo e sul pianeta, in condizioni di incertezza.

Innovation is central to advancing the Sustainable Development Goals and European agendas, yet current models struggle to address systemic complexity, trade-offs, and long-term transitions. This contribution presents the MUSAE project and its open-source Factory Model, an art-driven, futures-oriented operational framework aligned with the Industry 5.0 paradigm. At its core is the Design Futures Art-driven (DFA) method, which integrates trend analysis, visioning, ideation, and prototyping by combining artistic experimentation, design, technological development, and co-creation with artificial intelligence. Tested through art-and-technology residencies in the context of 'food as medicine', MUSAE shows how shared visions of the future can generate prototypes up to TRL5 and foster systemic synergies. The model interprets SDG 9 as an enabler of integrated, human- and planet-centred innovation under conditions of uncertainty.

Keywords

collaborazione arte-tecnologica, innovazione anticipatoria, sviluppo sostenibile, industria 5.0, design orientato all'esplorazione dei futuri e guidato dall'arte

art-technology collaboration, anticipatory innovation, sustainable development, industry 5.0, art-driven design futures



Marita Canina, is an Associate Professor at the Department of Design, Politecnico di Milano (Italy), and the Scientific Director of the IDEActivity Center. Her research focuses on design studies, creativity, and a people- and planet-centred approach, with particular attention to Design and Futures Thinking. E-mail: marita.canina@polimi.it

Tatiana Efremenko, PhD in Design, is a Research Fellow at the IDEActivity Center, Politecnico di Milano (Italy). Her research explores Design Futures applied to post-human urban environments and to interactions between human and non-human beings. She contributed to the Horizon Europe MUSAE project and developed methodologies for assessing social capital with SILK in Kyrgyzstan. E-mail: tatiana.efremenko@polimi.it

I primi decenni del XXI secolo sono sempre più spesso descritti come una condizione di policrisi (Morin, 2020) nella quale il cambiamento climatico, la perdita di biodiversità, l'instabilità geopolitica, le emergenze sanitarie e le crescenti disuguaglianze socio-economiche interagiscono in modo interdipendente e si rafforzano reciprocamente. Più che come perturbazioni isolate queste dinamiche si manifestano come intrecci sistemici che mettono in luce le fragilità profonde dei sistemi globali di produzione e delle infrastrutture.

In questo contesto i processi di innovazione restano centrali per lo sviluppo economico, il progresso tecnologico e la trasformazione sociale. Nelle agende politiche internazionali l'innovazione occupa una posizione chiave in quadri di riferimento quali gli Obiettivi di Sviluppo Sostenibile (SDG) delle Nazioni Unite (UN, 2015), il Green Deal europeo (European Commission, 2019) e la strategia Farm to Fork (European Commission, 2020). In particolare l'SDG 9 promuove infrastrutture resilienti, innovazione e un'industrializzazione inclusiva, collocando lo sviluppo tecnologico come motore della trasformazione sostenibile. Esso può quindi essere interpretato non solo come un obiettivo settoriale ma anche come una leva trasversale in grado di influenzare molteplici dimensioni della sostenibilità.

Nonostante tali ambizioni i progressi verso i target dell'Agenda 2030 rimangono disomogenei: a meno di cinque anni dalla scadenza il Sustainable Development Goals Report 2023 delle Nazioni Unite (UN, 2023) segnala che solo il 15% circa dei target è in linea con le traiettorie previste, mentre per oltre un terzo i progressi si sono arrestati o invertiti rispetto ai livelli del 2015. La pandemia di Covid-19, l'accelerazione della crisi climatica, i conflitti geopolitici e le crescenti disuguaglianze economiche hanno eroso i progressi conseguiti nel decennio precedente. La sfida non consiste più nell'accelerare l'implementazione degli obiettivi ma nel ripensare i sistemi di innovazione attraverso cui lo sviluppo viene concepito e attuato: come documentato dall'OECD (2024) i progressi più lenti si registrano proprio negli obiettivi che richiedono trasformazioni strutturali dei sistemi produttivi e delle culture dell'innovazione, non semplici miglioramenti incrementali.

Come evidenziato dalla letteratura sulle 'transizioni socio-tecniche profonde' (Schot and Steinmueller, 2018) la sostenibilità implica trasformazioni di lungo periodo che vanno ben oltre semplici miglioramenti tecnologici incrementali. Tuttavia i modelli dominanti di innovazione restano in larga misura ancorati a logiche lineari di ricerca e sviluppo, orientate all'ottimizzazione di breve periodo e alla competitività di mercato. Tali approcci tendono a concepire l'innovazione come un esercizio tecnico volto a risolvere problemi, spesso disconnesso dalle più ampie dinamiche socio-ecologiche e poco attento, nel lungo periodo, alle questioni di equità, governance e impatto ambientale (Stirling, 2015; OECD, 2018), di conseguenza faticano a confrontarsi con le sinergie e i compromessi tra i diversi SDG.

L'accelerazione della trasformazione digitale intensifica ulteriormente queste tensioni: intelligenza Artificiale, manifattura avanzata, robotica e infrastrutture dei dati offrono opportunità senza precedenti ma, se inserite in modelli estrattivi o orientate esclusivamente alla crescita, rischiano di amplificare il consumo di risorse e le disuguaglianze sociali. In risposta, il framework europeo dell'Industria 5.0[1] propone un cambio di paradigma che supera una visione dell'efficienza centrata sull'automazione e pone al centro l'essere umano, la sostenibilità e la resilienza come principi guida della trasformazione industriale (European Commission, 2021), riconfigurando l'innovazione come processo orientato a valori e missioni.

Un simile cambiamento richiede modelli di innovazione capaci di abilitare forme di governance anticipatoria, integrando l'esplorazione dei futuri, la riflessione etica e la deliberazione collettiva nei processi di sviluppo tecnologico (Guston, 2014; Ahern, 2025; Tõnurist and Hanson, 2020). L'innovazione anticipatoria implica infatti la capacità di immaginare, discutere e negoziare collettivamente visioni e orientare le traiettorie tecnologiche in modo consapevole. In tale prospettiva le pratiche artistiche e il design possono contribuire ad ampliare le dimensioni cognitive e culturali dell'innovazione, mettendo in discussione assunti dominanti ed esplorando traiettorie alternative (Purg, Cacciatore and Gerbec, 2023). Nonostante questo potenziale le collaborazioni tra arte e tecnologia restano spesso episodiche e prive di strutture metodologiche stabili (EUNIC, 2019), limitando il loro impatto nei processi di innovazione industriale.

Si pone così una questione metodologica centrale: come integrare in modo sistematico tali dimensioni anticipatorie nei processi di innovazione industriale, evitando che restino marginali o residuali? Piuttosto che considerarlo un obiettivo puramente tecnico, l'SDG 9 può essere reinterpretato come un'infrastruttura abilitante per le transizioni sistemiche, in cui l'innovazione industriale evolve in dialogo con i limiti ecologici, l'equità sociale e l'immaginazione culturale?

Alla luce di tali premesse il contributo si propone di analizzare il modello MUSAE Factory, risultato del progetto europeo MUSAE, come infrastruttura metodologica a codice aperto per un'innovazione sistemica, orientata ai futuri e guidata dall'integrazione tra arte e tecnologia. In particolare l'articolo intende: a) discutere i limiti dei modelli di innovazione dominanti rispetto alla complessità delle transizioni sostenibili; b) presentare il MUSAE Factory Model e il metodo Design Futures Art-driven (DFA); c) analizzarne l'applicazione attraverso casi studio nel contesto 'cibo come medicina'; d) valutare il contributo del modello nel gestire sinergie e compromessi tra gli SDG. In questo contributo l'SDG 9 è considerato come obiettivo abilitante, a supporto dell'integrazione degli SDG 12, 13 e 15, che sono direttamente affrontati attraverso i casi studio presentati e il MUSAE Factory Model.

Il paper è articolato in quattro parti: una prima sezione ricostruisce lo stato dell'arte sui modelli di innovazione per lo sviluppo sostenibile; una seconda presenta il MUSAE Factory Model e il metodo DFA; una terza analizza il modello e lo confronta con altre metodologie; una quarta discute limiti, trasferibilità e implicazioni rispetto agli SDG. L'interesse del contributo per la comunità scientifica risiede nella proposta di un modello integrato e trasferibile che combina pratiche artistiche, esplorazione dei futuri e sviluppo tecnologico, offrendo strumenti operativi per affrontare la complessità delle transizioni sostenibili in condizioni di incertezza.

Modelli di innovazione per lo sviluppo sostenibile | La ricerca sull'innovazione riconosce che affrontare le sfide della sostenibilità richiede profonde trasformazioni sistemiche delle configurazioni socio-tecniche, più che semplici aggiornamenti tecnologici incrementali. I sistemi di produzione industriale e gli ecosistemi dell'innovazione modellano infatti i flussi di risorse, le opportunità economiche e le forme di inclusione sociale. In questa prospettiva l'SDG 9 può essere interpretato come una matrice strutturale capace di orientare la transizione verso ecosistemi industriali e infrastrutturali più resilienti e sostenibili, generando effetti a cascata su molteplici altri SDG.

Negli ultimi anni sono emersi diversi quadri concettuali per rispondere a questa esigenza di trasformazione sistemica. La letteratura sulle 'politiche di innovazione trasformativa' propone un passaggio dal tradizionale sostegno alla ricerca e sviluppo e alla competitività verso transizioni sociotecniche di lungo periodo, allineate alle grandi sfide sociali (Schot and Steinmueller, 2018). Analogamente i modelli di 'innovazione orientata da missioni' promuovono sforzi coordinati tra attori pubblici e privati per affrontare sfide di ampia portata, come la neutralità climatica o la trasformazione dei sistemi alimentari (Mazzucato, 2018), mentre gli approcci improntati a 'ricerca e innovazione responsabili' enfatizzano anticipazione, riflessività, inclusione e reattività come principi chiave per la governance dell'innovazione (Nazarko, 2019).

Nonostante rappresentino un'evoluzione significativa rispetto ai paradigmi lineari di ricerca e sviluppo, tali modelli presentano ancora alcune lacune rilevanti, evidenziate da una letteratura in rapida crescita sulle transizioni sostenibili e sull'innovazione sistemica. Molti framework trasformativi tendono a concentrarsi prevalentemente sul coordinamento delle politiche e sulla scalabilità tecnologica, trascurando le dimensioni culturali e immaginative necessarie per operare in condizioni di incertezza e di conflitto valoriale; inoltre, pur riconoscendo le sinergie tra gli obiettivi di sostenibilità, spesso non dispongono di strumenti operativi in grado di affrontare esplicitamente i compromessi e le sinergie tra gli SDG a livello di sperimentazione collaborativa. Infine, come evidenziato da studi recenti su innovazione aperta e transizioni sostenibili, gli ecosistemi dell'innovazione rimangono spesso frammentati, con un'integrazione limitata tra attori tecnologici, discipline creative e stakeholder della società civile.

A ciò si aggiunge una crescente attenzione nella letteratura più recente al ruolo delle pratiche di innovazione aperta e co-creazione come leve per affrontare la complessità sistemica (Barbero and Ferrulli, 2023), poiché ha trasformato i processi di produzione della conoscenza e creazione di valore, definendoli come un paradigma in cui le imprese combinano conoscenze interne ed esterne attraverso collaborazioni distribuite (Bogers, Chesbrough and Moedas, 2018; Nambisan, Wright and Feldman, 2019). Tuttavia alcune critiche evidenziano la tendenza a privilegiare scalabilità tecnologica ed efficienza di mercato rispetto alla riflessione etica, alla sostenibilità di lungo periodo e a forme di governance inclusive (Bogers, Chesbrough and Moedas, 2018). Parallelamente gli studi sul design per la sostenibilità e sulla transizione socio-ecologica hanno evoluto il proprio ruolo, sottolineando la necessità di integrare approcci sistemici (Irwin, 2015; Tonkinwise, 2015; Zannoni et alii, 2024), pratiche rigenerative (Escobar, 2018) e modelli circolari nei processi di innovazione (Ceschin and Gaziu-

lusoy, 2016). In sintesi molti ecosistemi dell'innovazione faticano ancora a tradurre politiche di alto livello in metodologie operative capaci di coordinare collaborazione interdisciplinare e processi sperimentali: integrare sviluppo tecnologico, riflessione culturale, considerazioni etiche e visioni di lungo periodo continua a rappresentare una sfida strutturale per i sistemi industriali.

Il paradigma dell'Industria 5.0 rafforza ulteriormente questa traiettoria, richiamando la necessità di sistemi di innovazione centrati sulla persona, resilienti e sostenibili. Tuttavia rendere operativi tali principi richiede infrastrutture metodologiche concrete, in grado di integrare l'esplorazione dei futuri, la riflessione etica e la collaborazione intersettoriale nei processi industriali. La letteratura sulla governance anticipatoria sottolinea come l'innovazione debba spostarsi dalla risoluzione reattiva dei problemi a un'esplorazione proattiva di futuri alternativi, incorporando pratiche collettive di costruzione di visioni nei processi decisionali (Guston, 2014; OECD, 2018).

In questo quadro gli approcci interdisciplinari che mettono in relazione la ricerca tecnologica con le pratiche artistiche e culturali stanno acquisendo rilevanza: le collaborazioni tra arte e tecnologia hanno infatti dimostrato la capacità di attivare la riflessione critica, di ampliare gli immaginari e di mettere in discussione le narrazioni dominanti del progresso (Whitaker, 2016; Minski, 2020), contribuendo a rendere visibili le implicazioni sociali ed etiche dello sviluppo tecnologico attraverso pratiche sperimentali, narrative e prototipali: recenti ricerche hanno evidenziato come l'integrazione di tecnologia emotiva e pratiche narrative possa generare consapevolezza negli utenti rispetto a temi complessi come la transizione sostenibile (Valenti et alii, 2024).

Negli ultimi anni tali approcci si sono intrecciati con il crescente campo delle pratiche art-tech e delle collaborazioni tra industrie culturali e creative e settori tecnologici, evidenziando il ruolo della cultura come infrastruttura dell'innovazione (Klein, Gerlitz and Spychalska-Wojtkiewicz, 2021; Dolejsova et alii, 2021) sebbene la letteratura sottolinei che queste pratiche restano spesso marginali rispetto ai modelli industriali dominanti e raramente integrate in processi strutturati e scalabili.

Queste pratiche si intrecciano con l'ambito emergente del Design Futures che integra metodologie di design e studi sul futuro per esplorare trasformazioni sociali di lungo periodo (Bühring and Liedtka, 2018). Gli approcci di Design Futures (Canina and Monestier, 2023) utilizzano scenari speculativi, la costruzione partecipata di visioni e la prototipazione narrativa per indagare futuri possibili e desiderabili, consentendo alle organizzazioni di anticipare le sfide emergenti ed esplorare traiettorie alternative di sviluppo tecnologico (Candy and Dunagan, 2017; Dunne and Raby, 2013). Tali approcci, sempre più diffusi anche nei contesti di policy e innovazione pubblica, favoriscono una riflessione critica sulle implicazioni sistemiche dello sviluppo tecnologico, contribuendo a integrare dimensioni temporali, etiche e culturali nei processi decisionali.

Nonostante il loro potenziale queste metodologie guidate dall'arte restano spesso periferiche nei framework industriali dominanti, prive di modelli di implementazione strutturati, mentre il pensiero orientato ai futuri è raramente incorporato come componente operativa e continua nei processi di innovazione (Miller, 2018). Molte collaborazioni tra artisti, designer e tecnologi si sviluppano in contesti temporanei e sperimentali, senza disporre di metodologie in grado di generare impatti di lungo periodo (Monestier et alii, 2024; Schnugg and Song, 2020); di conseguenza il loro contributo alle transizioni sistemiche verso la sostenibilità rimane frammentato e solo parzialmente integrato nei processi mainstream di innovazione.

A questa criticità si aggiunge una limitata disponibilità di modelli valutativi in grado di misurare l'impatto delle pratiche interdisciplinari sulle transizioni sostenibili, tema sempre più rilevante nella letteratura recente sulla valutazione delle trasformazioni socio-tecniche e sull'impatto degli SDG (Nilsson, Griggs and Visbeck, 2016; Pham-Truffert et alii, 2020).

Affrontare le complesse sinergie tra gli SDG richiede pertanto non solo sperimentazione creativa, ma anche infrastrutture metodologiche in grado di coordinare la collaborazione interdisciplinare. Questa esigenza è resa ancora più urgente dal fatto che gli SDG in maggiore difficoltà – SDG 13, 14 e 15, ma anche gli SDG 2 e 3 – sono quelli che richiedono trasformazioni culturali e sistemiche profonde, non solo soluzioni tecniche.

Il rallentamento dei progressi documentato dal Global Assessment Report dell'UNDRR (2022) segnala che l'aumento della frequenza degli eventi climatici estremi sta erodendo le infrastrutture e i sistemi produttivi su cui si fondano molti altri obiettivi, in una dinamica di interdipendenza negativa che i modelli lineari di innovazione faticano ad affrontare. La sfida non consiste dunque semplicemente nel promuovere la sperimentazione interdisciplinare, ma nel progettare un'infrastruttura dell'innovazione che integri in modo sistematico l'esplorazione dei futuri, l'indagine artistica e lo sviluppo tecnologico all'interno di un quadro coerente e replicabile.

In questo contesto il contributo si propone di colmare il divario tra approcci sperimentali e applicazioni sistemiche, introducendo tre elementi di discontinuità rispetto alla letteratura esistente: in primo luogo il MUSAE Factory Model introduce un'integrazione strutturata tra pratiche artistiche e innovazione industriale, superando la dimensione episodica delle collaborazioni art-tech; in secondo luogo il metodo DFA adotta il 'futures thinking' come dispositivo operativo per orientare i processi di innovazione in condizioni di incertezza; in terzo luogo propone il passaggio da modelli di collaborazione



Fig. 1 | Participants in the MUSAE art-technology residency: artists, companies, and the MUSAE consortium (credit: the Authors, 2025).

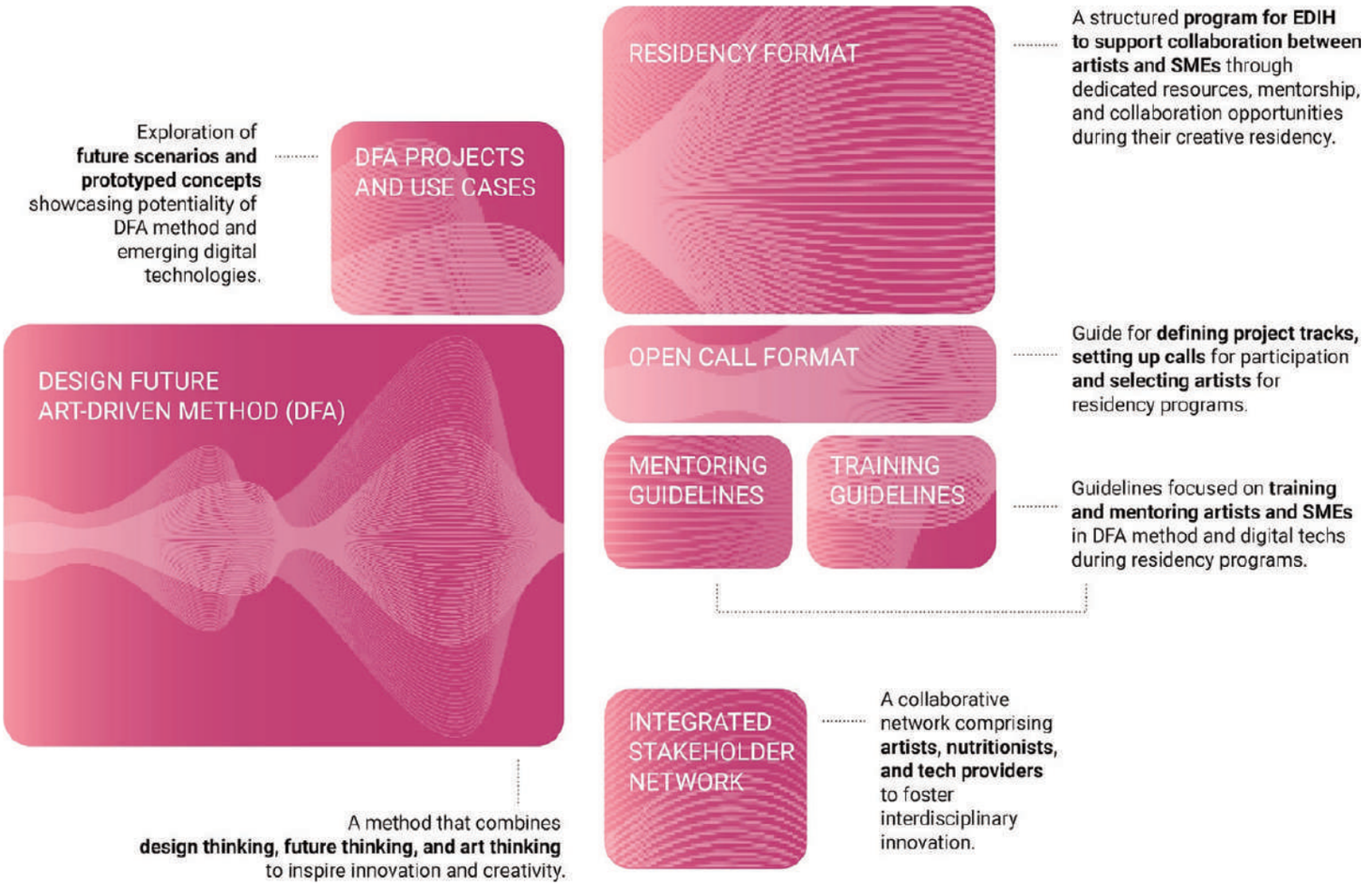


Fig. 2 | MUSAE Factory Model (credit: the Authors, 2025).

temporanei a un'infrastruttura metodologica trasferibile, capace di sostenere processi di innovazione sistemica e replicabile in contesti diversi.

MUSAE Factory Model | Il progetto Horizon Europe MUSAE (2022-2025), inserito nell'ecosistema STARTS, ha esplorato il contributo della collaborazione tra arte e tecnologia a un'innovazione sostenibile e centrata sulle persone e sul pianeta, rafforzando al contempo il ruolo degli European Digital Innovation Hubs (EDIH). Il focus è stato il dominio 'cibo come medicina', caratterizzato da forti sinergie con gli SDG 3, 9, 12 e 13. Attraverso due programmi di residenza in cui sviluppare la collaborazione arte-tecnologia, MUSAE ha coinvolto 23 artisti e 11 imprese di piccola e media dimensione (Fig. 1), producendo dodici scenari futuri e undici prototipi sviluppati fino al Technology Readiness Level 5, inteso come validazione del prototipo completo in ambiente rilevante, attestata dalla valutazione dei partner tecnologici del consorzio MUSAE, dai test effettuati con utenti finali e dalla mostra pubblica al Palazzo della Scienza di Belgrado.

La collaborazione artistica è stata concepita come componente strategica del processo: le barriere tipiche, i gap comunicativi, l'assenza di metodologie condivise e il disallineamento degli obiettivi sono stati affrontati attraverso un quadro metodologico replicabile in grado di bilanciare libertà creativa e rigore procedurale. L'esito principale di questo percorso è il MUSAE Factory Model: un framework a codice aperto per un'innovazione sistemica e orientata ai futuri, in linea con i principi dell'Industria 5.0. Il Factory Model non si configura come un singolo metodo ma come un ecosistema integrato (Fig. 2) articolato in tre componenti principali: 1) Risorse metodologiche, centrate sul metodo Design Futures Art-driven (DFA) e relativi strumenti; 2) Risorse organizzative che comprendono format di residenza, call aperte, linee guida delle attività di formazione e guida; 3) Risorse di comunità, ossia la rete che connette artisti, imprese, tecnologi, educatori ed esperti del dominio. Questa architettura risponde alla carenza di framework in grado di sostenere collaborazioni tra arte e tecnologia nel lungo periodo: integrando il processo artistico in una metodologia strutturata e in ambienti digitali collaborativi (come Figma[2] e Miro[3]) il modello trasforma la sperimentazione creativa in una sequenza operativa replicabile.

Al centro del Factory Model si colloca il metodo DFA (Efremenko et alii, 2025) che integra tre pratiche complementari: il Futures Thinking, per esplorare futuri alternativi e preferibili; il Design Thinking, per strutturare processi iterativi orientati alla prototipazione; l'Art Thinking, per introdurre dimensioni critiche, immaginative ed emotive (Fig. 3). Fondato sul modello del Double Diamond (Design Council, 2005) ed esteso attraverso il 'futures cone' di Voros (2003) il metodo si articola in quattro fasi: analisi delle tendenze, visione, ideazione e prototipazione. La prima fase analizza segnali emergenti e sfide sistemiche; la seconda costruisce scenari condivisi; la terza sviluppa concetti interdisciplinari ampliando lo spazio delle possibilità; la quarta traduce le idee in prototipi, sviluppati fino al TRL5.

L'IA generativa è utilizzata come collaboratore creativo nei processi di ideazione, visualizzazione e narrazione. L'originalità del metodo risiede nella sua capacità di rispondere a tre limiti dei modelli di innovazione dominanti:
1) Dal problema alla visione – il DFA supera l'approccio centrato sul problema e avvia il processo a partire da visioni condivise di futuri preferibili permettendo di valutare ex ante le implicazioni tecnologiche, ambientali e sociali e orientare le scelte verso esiti coerenti con la sostenibilità di lungo periodo;
2) Gestione delle sinergie e dei compromessi tra gli SDG – integra strumenti sistemici (STEEP+V, mappatura degli stakeholder anche non umani, matrici di incertezza) che rendono esplicite interdipendenze, sinergie e compromessi tra gli SDG, favorendo un confronto anticipato sugli impatti e superando logiche puramente antropocentriche;
3) Integrazione dell'intelligenza culturale ed emotiva – il DFA, insieme al MUSAE Factory Model, risponde a una delle principali lacune dei sistemi di innovazione contemporanei, reintegrando dimensioni culturali, etiche ed ecologiche nei processi di innovazione configurandosi come infrastruttura cognitiva e collaborativa per l'Industria 5.0 e orientando l'innovazione verso traiettorie sistemiche e responsabili.

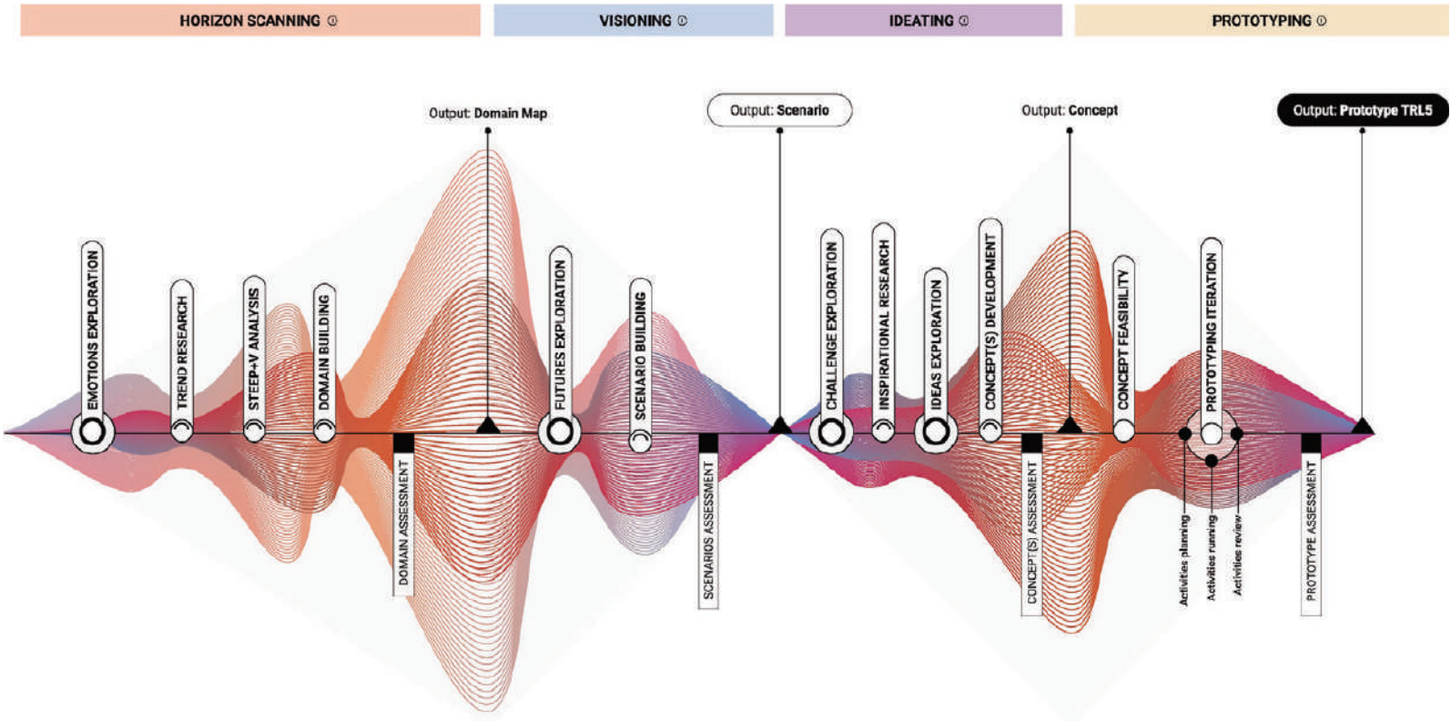


Fig. 3 | Design Futures Art-driven (DFA) method (credit: the Authors, 2025).

Posizionamento del MUSAE Factory Model nel panorama dei modelli di innovazione arte-tecnologia | Al fine di analizzare criticamente il MUSAE Factory Model il contributo adotta un approccio che distingue tra: a) il modello metodologico oggetto di analisi; b) casi studio sviluppati al suo interno, utilizzati come evidenze applicative; c) modelli e framework internazionali di riferimento, impiegati per il confronto critico. Questa analisi colloca il MUSAE Factory Model e il relativo metodo DFA all'interno dei framework esistenti di collaborazione arte-tecnologia e delle metodologie strutturate per l'innovazione industriale.

La selezione dei riferimenti internazionali è stata effettuata sulla base dei seguenti criteri: a) integrazione tra pratiche creative e innovazione tecnologica; b) presenza di approcci orientati ai futuri o anticipatori; c) rilevanza nel dibattito su sostenibilità e transizioni socio-tecniche; d) livello di strutturazione metodologica; e) potenziale di trasferibilità e replicabilità.

Sono stati selezionati quattro metodi o framework. Il primo, S+T+ARTS Initiative, ha sviluppato tre modalità collaborative, Art-Enabled Prototyping, Art-Influenced Science e Art-Driven Technology (van Vliet, 2020) che strutturano l'interazione tra artisti, scienziati e industria; pur rappresentando un avanzamento rispetto a collaborazioni precedentemente informali queste tipologie funzionano principalmente come strumenti di facilitazione, senza configurarsi come percorsi operativi di innovazione in quanto mancano fasi esplicite di 'futures thinking' e un collegamento sistematico tra sperimentazione artistica e prototipazione a livelli TRL definiti.

Il secondo è il metodo Art-Driven Innovation (ADI; Fig. 4; In4Art, 2020) che utilizza database di opere artistiche come punto di partenza per l'innovazione responsabile, collegando tecnologie e SDG attraverso i percorsi 'green' e 'care'; sebbene fortemente orientato alla sostenibilità, parte da opere esistenti piuttosto che da visioni future co-create, limitando in alcuni casi la capacità generativa in contesti ad alta incertezza.

Il ciclo di innovazione MAST (Tab. 1), sviluppato nell'ambito del programma Erasmus+, come terzo caso selezionato, pone l'Art Thinking prima del Design Thinking in un processo in dieci fasi (Castillo-Rutz and Purg, 2021); pur enfatizzando il ruolo centrale dell'indagine artistica rimane principalmente un modello educativo, con limitata applicazione documentata in contesti industriali e senza chiari riferimenti ai TRL.

L'ultimo è il progetto Better Factory (Fig. 5; van Vliet et alii, 2024), il più vicino al modello MUSAE in quanto struttura collaborazioni tra artisti, piccole e medie imprese e tecnologi in quattro fasi: definizione della sfida, 'matchmaking', sperimentazione iterativa e modellazione d'impresa, sebbene adotti un approccio guidato dai problemi e non includa una fase strutturata di pensiero orientato ai futuri.

Per sistematizzare il confronto tra il MUSAE Factory Model e i principali framework internazionali è stata sviluppata una sintesi comparativa basata su cinque dimensioni: punto di accesso all'innovazione, ruolo della pratica artistica, integrazione del futures thinking, applicabilità industriale e trasferibilità; la Tabella 2 sintetizza tali differenze evidenziando i posizionamenti e le criticità dei diversi approcci.

In questo quadro i progetti SOIL e Growing Futures sono analizzati come casi applicativi del modello MUSAE, mentre il confronto critico è sviluppato rispetto a modelli e pratiche internazionali affini. La comparazione evidenzia come il MUSAE Factory Model si distingua per l'integrazione simultanea di tre dimensioni raramente presenti congiuntamente nei modelli analizzati: 1) un punto di accesso orientato alla visione e basato sulla costruzione condivisa di scenari futuri; 2) una formalizzazione metodologica esplicita che struttura il processo in fasi replicabili; 3) una connessione operativa con contesti industriali che consente di tradurre visioni speculative in prototipi a livelli TRL intermedi.

Di contro i modelli analizzati tendono a sviluppare queste dimensioni in modo parziale: le metodologie STARTS privilegiano la flessibilità ma mancano di una percorsi operativi strutturati; ADI introduce un forte orientamento alla sostenibilità ma limita la generatività futura; MAST enfatizza il ruolo dell'arte ma resta confinato a contesti educativi; Better Factory garantisce applicabilità industriale ma adotta un approccio prevalentemente guidato dai problemi, privo di una fase anticipatoria esplicita.

Da questa lettura emergono due implicazioni principali: in primo luogo il pensiero orientato al futuro risulta sistematicamente sottoutilizzato come dispositivo operativo nei processi di innovazione, nonostante il suo potenziale nel gestire incertezza e complessità; in secondo luogo i modelli orientati alla visione e guidati dai problemi appaiono complementari poiché mentre il primo abilita trasformazioni di lungo periodo, il secondo facilita l'adozione industriale nel breve termine. Il MUSAE Factory Model si colloca in questa tensione, proponendo un'integrazione tra dimensione anticipatoria e applicazione operativa. Permangono tuttavia alcune criticità condivise con la letteratura, in particolare in relazione alla scalabilità del modello, alla validazione su larga scala e alla misurazione degli impatti nel lungo periodo, aspetti che richiedono ulteriori sviluppi metodologici ed empirici. Le sezioni successive analizzano come il framework sia stato reso operativo nelle residenze di MUSAE, con particolare attenzione ai due progetti rappresentativi SOIL e Growing Futures, mostrando come l'SDG 9 possa agire da abilitatore sistemico della trasformazione industriale sostenibile.

Casi applicativi del MUSAE Factory Model: SOIL e Growing Futures | In coerenza con il posizionamento del contributo rispetto agli SDG, in cui l'analisi ha evidenziato una convergenza prevalente verso l'intersezione tra gli SDG 9, 12, 13 e 15, con l'SDG 9 inteso come obiettivo abilitante, la selezione dei casi studio è stata orientata a rendere esplicite tali relazioni attraverso evidenze applicative. È importante chiarire che i criteri utilizzati per la selezione dei casi derivano direttamente dal sistema di valutazione sviluppato dal consorzio MUSAE per verificare la completezza e la qualità degli undici progetti realizzati. Tali criteri sono stati comunicati fin dall'inizio ai team partecipanti che, attraverso i cinque deliverable previsti, erano chiamati a dimostrare il loro effettivo soddisfacimento lungo l'intero processo di sviluppo.

La selezione di SOIL e Growing Futures risponde dunque a criteri valutativi consolidati. Entrambi i progetti hanno ottenuto i punteggi più elevati nelle due principali fasi di valutazione del progetto MUSAE: la valutazione del concept e quella del prototipo finale. La prima ha considerato sette dimensioni: maturità del concetto, tecnologia, esperienza utente, collaborazione, etica, sostenibilità e fattibilità finanziaria, mentre la seconda ha attestato il raggiungimento del TRL5 sulla base di quattro aree principali: impatto positivo (settoriale, sociale e ambientale), innovazione, interazione con l'utente e gestione del rischio. Il materiale oggetto di valutazione comprendeva sia i prototipi funzionanti a TRL5 sia i cinque deliverable finali prodotti dai team, che documentano in modo sistematico lo sviluppo del processo.

Nel contesto del progetto MUSAE il TRL5 indica il raggiungimento di un prototipo completo validato in un ambiente rilevante attraverso un processo strutturato e condiviso che ha coinvolto l'intero consorzio tecnologico e la validazione con utenti finali. In particolare la validazione ha coinvolto agricoltori nel caso di SOIL e designer nel caso di Growing Futures. È tuttavia necessario precisare che tale livello non corrisponde a una validazione in ambiente operativo reale (TRL6-7), che richiederebbe test su ampia scala, ingegnerizzazione avanzata e certificazione, ma a una validazione in condizioni simulate o controllate, sufficiente a dimostrare la fattibilità tecnica e la coerenza del prototipo rispetto ai criteri di impatto, usabilità e sostenibilità.

I due casi sono stati selezionati anche per la loro capacità di rappresentare in modo complementare le dimensioni centrali del modello. SOIL esemplifica il rapporto tra visione futura, sensoristica ambientale e pratiche agricole rigenerative, con una forte connessione agli SDG 13 e 15; Growing Futures illustra invece l'integrazione tra biofabbricazione, robotica avanzata e design post-antropocentrico, con rilevanza diretta per gli SDG 9 e 12. Considerati congiuntamente i due casi mostrano come il DFA possa generare traiettorie innovative di tipo trasformativo, piuttosto che incrementale, in contesti caratterizzati da elevata incertezza ecologica e tecnologica.

Allo stesso tempo essi consentono di delimitare con maggiore precisione ciò che il MUSAE Factory Model ha effettivamente dimostrato, ovvero la capacità di guidare collaborazioni arte-tecnologia fino allo sviluppo di prototipi maturi e validati, rispetto a ciò che rimane ancora un potenziale da sviluppare nelle fasi successive, in particolare il passaggio verso livelli di maturità tecnologica più elevati e forme stabili di adozione industriale e diffusione su larga scala.

SOIL: agricoltura rigenerativa | Il progetto SOIL (2025), frutto della collaborazione tra l'artista Letizia Artioli, l'impresa Uptoearth, un agricoltore e una designer di moda, affronta il tema del degrado del suolo, una delle principali sfide ambientali contemporanee, strettamente connessa alla perdita di biodiversità, al cambiamento climatico e ai modelli insostenibili di produzione alimentare. Il progetto trae origine dallo scenario futuro 'Soil Skinships'[4], sviluppato da Lisa Mandemaker, che immagina una relazione sensoriale tra esseri umani e suolo mediata da dispositivi tecnologici. Coerentemente con il DFA il progetto prende avvio da una visione condivisa di futuro piuttosto che da un problema tecnico predefinito.

Attraverso un'esplorazione speculativa il suolo viene reinterpretato come infrastruttura vivente inserita in sistemi socio-ecologici complessi; l'esito è un prototipo indossabile che traduce i dati del suolo in stimoli sensoriali percepibili dal corpo umano. Il dispositivo integra sensori ambientali in grado di rilevare parametri quali l'umidità, la temperatura e altre condizioni del terreno (Figg. 6-8); i dati raccolti vengono convertiti in segnali tattili e sonori, percepiti direttamente dall'agricoltore attraverso l'indumento, trasformando le misurazioni astratte in un'esperienza corporea.

Il progetto propone un paradigma alternativo in cui l'infrastruttura agricola diventa relazionale ed esperienziale, superando modelli basati esclusivamente sul controllo remoto; in tal modo, attraverso l'innovazione, SOIL sostiene le pratiche agricole rigenerative, rafforzando la consapevolezza ecologica e integrando dimensioni tecnologiche e ambientali.

Growing Futures: habitat rigenerativi tra micelio e robotica | Il progetto Growing Futures (2025) esplora le relazioni tra materiali biologici, fabbricazione robotica e design rigenerativo. Sviluppato dall'artista e designer Daniela Amandolese con il Basque Biodesign Center il progetto indaga come i processi di crescita biologica e le tecnologie di fabbricazione avanzata possano essere combinati per generare nuove forme di infrastruttura sostenibile; si basa sullo scenario 'What the World Eats – Agro-Technologies in Earthly Futures'[5] sviluppato da Peter Andersen che immagina infrastrutture ibride tra sistemi biologici e tecnologici operanti in modo simbiotico. Anche in questo caso il progetto parte da una visione futura, mettendo in discussione la separazione tra naturale e artificiale e reinterpretando l'infrastruttura come sistema vivente.

Il progetto combina la crescita biologica del micelio con la fabbricazione robotica: i sistemi robotici guidano e modellano lo sviluppo del micelio, replicando strutture reticolari naturali e consentendo la creazione di forme spaziali complesse. Il risultato è un prototipo di habitat bio-responsivo, capace di adattarsi e auto-rigenerarsi, integrandosi nei cicli ecologici (Figg. 9-11). Il progetto evidenzia un passaggio verso approcci post-antropocentrici in cui processi naturali e tecnologici operano in modo integrato.

Gestire sinergie e compromessi attraverso un modello guidato dall'arte | I due progetti pur operando in ambiti differenti condividono la stessa logica metodologica del MUSAE Factory Model. In entrambi i casi l'innovazione parte da scenari futuri condivisi che riconfigurano l'infrastruttura come sistema vivente e relazionale. Questo approccio supera una logica lineare e soluzionista a favore di una riformulazione anticipatoria: invece di ottimizzare l'efficienza all'interno di paradigmi industriali consolidati, il metodo DFA amplia lo spazio del problema attraverso pratiche di analisi delle prospettive e di visione, per convergere poi nella fase di prototipazione. Senza queste fasi i progetti avrebbero probabilmente seguito traiettorie tecnologiche convenzionali, con risultati incrementali anziché trasformativi. Il confronto discusso in precedenza chiarisce questo aspetto: il DFA è tra i pochi approcci che utilizzano gli scenari futuri come dispositivo generativo del processo, mentre altri framework operano su sfide predefinite o contenuti esistenti.

Il modello risponde alla frammentazione degli ecosistemi di innovazione integrando dimensioni tecnologiche, ecologiche e culturali in un unico processo. Gli artisti agiscono come co-designer delle traiettorie di innovazione, mettendo in discussione assunti industriali dominanti e favorendo un dialogo intersettoriale più ampio. Proprio per queste ragioni il metodo DFA è stato selezionato per l'ADI Design Index 2025 come uno dei più rilevanti progetti italiani di ricerca nel design nella categoria Ricerca per l'Impresa[6]. Questo riconoscimento conferma la crescente rilevanza di approcci innovativi, anticipatori e immaginativi nell'innovazione industriale e aziendale.

L'aspetto più significativo riguarda la riconfigurazione dell'innovazione come leva per le transizioni sistemiche verso la sostenibilità; in questa prospet-

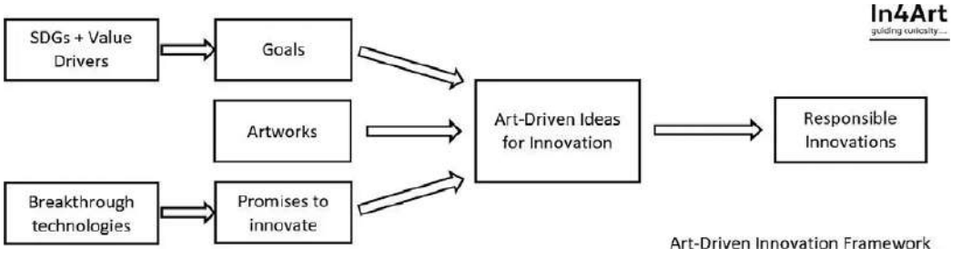


Fig. 4 | Art-Driven Innovation (ADI) framework (source: In4Art, 2020).

No.	Method	Description
1	Challenge	Identify the topic by determining a set of relevant questions that lead to a deep understanding of the issue at stake
2	Team	Create a varied expert group (artists, designers, entrepreneurs, scientists, inventors, philosophers, researchers, etc., whether they are individuals, groups or institutions) in order to establish an innovation team
3	Rules	Creating a scaffolding of policies, strategies, laws, conventions and values, in order to arrive at a clear ethical framework for the process and its results (including defining common grounds, creating a manual of conduct and envisioning social sustainability)
4	Mapping	Mapping of the existing cases, good and bad practices, their theory and implementation; understanding of these cases inside of their ecosystem(s), i.e. in the cultural, historical, political economical context
5	Beneficiaries	Deeply understanding the beneficiaries and finding out how to negotiate the values involved (with decision-makers and final users), making them understand the existing practices mapped; deciding about the time-frame of the process of innovation
6	Art Thinking	By referring to already known artistic ideations, the perspectives on the topic are changed; artworks and artistic ideas are explored to create a mind shift and inspire, generating different and new questions
7	Design Thinking	Understanding and utilizing the possibilities in creative solutions, the potential scenarios, demos, prototypes, models etc. which brings about multiple possible solutions
8	Modelling	Designed solutions (as proposals) are chosen or prioritized; creating more detailed scenarios, demos, pre-testing etc.; in the design paradigm this is usually called prototyping (of both non-functional and functional kind). At the end, one solution is chosen
9	Applicability	Testing the full solution (prototype) in the real and tangible context; this might show the need for iteration of any of the previous 'stages'; the solution is applied, implemented for real and in the real
10	Impact	Final evaluation of change or transformation, leading to lessons learned, and several kinds of legacy (experience, skills / knowledge, network, data sets etc.) as well as sustainability (longevity) solutions

Tab. 1 | MAST innovation cycle: a ten-stage process integrating Art Thinking and Design Thinking (source: Castillo-Rutz and Purg, 2021).

tiva l'innovazione non è più una fonte di esternalità che compromettono altri obiettivi ma diventa il mezzo attraverso cui costruire sinergie. Ciò che distingue questi casi non è soltanto l'allineamento con più SDG ma anche l'integrazione concreta delle loro sinergie nel processo di innovazione. Attraverso una riflessione orientata ai futuri il DFA consente agli stakeholder di anticipare potenziali compromessi tra accelerazione tecnologica e integrità ecologica, riorientando di conseguenza le traiettorie progettuali. Il valore aggiunto del modello risiede meno nei singoli prototipi e più nella sua capacità di trasformare i processi e la cultura dell'innovazione, proponendo un'infrastruttura metodologica trasferibile.

Questa capacità di generare e rendere visibili tali dinamiche è emersa con particolare evidenza nella mostra finale del progetto MUSAE, 'Grow, Cook, Code – Rethinking Food Futures', ospitata presso il Palazzo della Scienza di Belgrado. L'evento ha funzionato non solo come vetrina dei risultati, ma anche come dispositivo di validazione pubblica e sociale: oltre 2.000 visitatori tra cittadini, artisti, imprese, ricercatori e Istituzioni hanno interagito con 11 prototipi funzionanti, esplorandone potenzialità e criticità.

Questa dimensione pubblica riveste una rilevanza metodologica per almeno tre ragioni: in primo luogo l'interazione diretta ha consentito di testare la comprensibilità delle visioni progettuali, trasformando oggetti tecnologici complessi in strumenti di mediazione tra domini diversi; in secondo luogo ha contribuito a rafforzare la fiducia nelle tecnologie emergenti, evidenziandone l'orientamento verso obiettivi sociali ed ecologici; infine ha reso tangibile il potenziale del MUSAE Factory Model come infrastruttura non solo per l'innovazione industriale ma anche per la partecipazione pubblica alle traiettorie tecnologiche, in linea con approcci di governance anticipatoria.

I prototipi esposti hanno dimostrato come tecnologie esistenti possano essere ricombinate attraverso visioni orientate al futuro per affrontare sfide sistemiche nel dominio 'cibo come medicina'. Tra questi Sprout to Flourish supporta la transizione verso pratiche agricole rigenerative attraverso simulazioni interattive (Fig. 12); Remedy Garden propone un'architettura bio-inclusiva per la coltivazione urbana di piante medicinali (Fig. 13); Neurocooking utilizza il biofeedback per trasformare la cucina in un'esperienza terapeutica (Fig. 14); Nourish connette nutrizione e stati cognitivi attraverso l'analisi EEG (Fig. 15).

Nel loro insieme questi esempi mostrano come il MUSAE Factory Model e il metodo DFA siano in grado di generare traiettorie di innovazione distinte ma coerenti, combinando struttura metodologica ed esplorazione creativa, una tensione produttiva che rappresenta uno degli elementi più distintivi del modello.

Verso sistemi di innovazione rigenerativi e anticipatori | Il divario persistente tra l'ambizione degli SDG e i progressi disomogenei registrati verso il 2030 evidenzia non solo difficoltà di implementazione, ma anche limiti strutturali radicati nelle culture e nei modelli dominanti di innovazione. I paradigmi tecno-economici convenzionali, spesso orientati al breve termine e caratterizzati da frammentazione e scarsa capacità di anticipazione, faticano infatti ad affrontare le sinergie sistemiche e i compromessi che attraversano l'intera agenda degli SDGs. Il MUSAE Factory Model risponde a questa esigenza introducendo un framework che integra immaginazione speculativa, anticipazione strutturata e prototipazione collaborativa. Attraverso il metodo DFA, l'innovazione viene riorientata attorno a visioni condivise di futuri preferibili, anziché vincolata esclusivamente a parametri tecnici predefiniti.

I casi analizzati mostrano come tali approcci possano integrare dimensioni ecologiche e tecnologiche e supportare traiettorie di innovazione più coerenti. In questo quadro il modello contribuisce a riallineare sviluppo tecnologico e sostenibilità, proponendo un approccio operativo in contesti di incertezza sistemica.

Per evitare che il riferimento agli SDG rimanga puramente dichiarativo è necessario esplicitare il contributo del MUSAE Factory Model rispetto all'intero sistema degli SDG 1-17. In questa prospettiva il modello non agisce in modo lineare su singoli obiettivi ma come dispositivo di innovazione anticipatoria capace di attivare sinergie, rendere visibili compromessi e orientare le traiettorie progettuali in relazione a una pluralità di SDG.

La Tabella 3 propone una mappatura sistematica di tale relazione, articolata in cinque categorie analitiche: SDG direttamente attivati, indirettamente coinvolti, potenzialmente sinergici, associati a rischi o compromessi e marginali rispetto al perimetro del modello. Gli SDG 'direttamente attivati' sono quelli per i quali il modello produce contributi dimostrabili attraverso i progetti esemplari e la struttura metodologica. Gli SDG 'indirettamente coinvolti' sono quelli che beneficiano delle ricadute del

modello senza esserne l'obiettivo esplicito. Gli SDG con 'possibili sinergie' sono quelli per i quali il modello mostra potenziale connessione, condizionata dal contesto applicativo o da sviluppi futuri.

Gli SDG nei confronti dei quali possono emergere 'compromessi o rischi' sono quelli per i quali l'innovazione tecnologica guidata dal modello può generare tensioni o esternalità irrisolte. Gli SDG 'marginali o non direttamente pertinenti' sono infine quelli che esulano dall'ambito di applicazione del modello nei casi analizzati, pur non essendo esclusi in linea di principio da applicazioni future in domini diversi. L'obiettivo non è rivendicare una copertura estesa degli SDG ma rendere esplicite e argomentate le relazioni effettive tra il modello e l'Agenda della sostenibilità.

È infine importante precisare che questa mappatura si riferisce alla configurazione attuale del MUSAE Factory Model, sviluppata nel dominio 'cibo come medicina' e validata attraverso gli undici prototipi realizzati, tra cui SOIL e Growing Futures; la trasferibilità del modello ad altri domini potrebbe modificare il profilo di rilevanza rispetto agli SDG, ampliando gli ambiti di attivazione diretta o introducendo nuovi potenziali compromessi.

Limiti, barriere e trasferibilità del modello | Nonostante il potenziale trasformativo del MUSAE Factory Model, emergono alcune criticità rilevanti in relazione alla scalabilità e alla trasferibilità dei risultati. I prototipi sviluppati nei casi analizzati si collocano prevalentemente a livello TRL5, corrispondente a una validazione in ambiente rilevante ma ancora distante da forme stabili di adozione industriale. È infatti necessario un chiarimento concettuale preliminare per comprendere correttamente i limiti del modello.

MUSAE Factory Model non è concepito come un percorso di sviluppo prodotto orientato alla commercializzazione immediata, né i prototipi a TRL5 rappresentano versioni preindustriali di prodotti o servizi pronti per il mercato. L'obiettivo del modello è di natura diversa e per certi versi più ambiziosa sul piano sistemico: immaginare traiettorie future possibili e preferibili, identificare sfide emergenti, mappare interdipendenze tra dimensioni tecnologiche, ecologiche e sociali, anticipare impatti e compromessi prima che le traiettorie di innovazione si consolidino in forme difficilmente reversibili. In questa prospettiva i prototipi non sono prodotti incompiuti ma dispositivi cognitivi e culturali: strumenti per rendere tangibili visioni altrimenti astratte, per facilitare il dialogo tra stakeholder eterogenei e per testare la coerenza interna di un'idea rispetto a criteri di sostenibilità, usabilità ed etica.

Questa distinzione è rilevante non solo per valutare correttamente il modello ma anche per evitare un fraintendimento frequente nella letteratura sull'innovazione che tende a misurare il valore di un processo creativo dalla sua prossimità al mercato. Il MUSAE Factory Model opera a un livello diverso della catena dell'innovazione: quello dell'esplorazione orientata, in cui la domanda centrale non è 'questo prodotto è commercializzabile?' ma 'questa visione è desiderabile, sostenibile e tecnicamente percorribile?' Il passaggio eventuale verso TRL superiori e verso forme di adozione industriale è possibile ma richiede condizioni, attori e risorse che esulano dal perimetro del modello stesso e che costituiscono una scelta metodologica consapevole, coerente con un approccio di governance anticipatoria (Guston, 2014) dell'innovazione.

Il MUSAE Factory Model evidenzia il potenziale di un approccio integrato tra arte, tecnologia e 'futures thinking' ma anche limiti strutturali e condizioni di validità legate al contesto in cui è stato sviluppato. In particolare il modello nasce in condizioni specifiche: finanziamento Horizon Europe, dominio 'cibo come medicina', infrastruttura basata su European Digital Innovation Hubs (EDIH) e un contesto europeo favorevole alla collaborazione arte-tecnologia che risultano determinanti e non sempre replicabili.

Il modello si colloca prevalentemente a livelli intermedi di maturità tecnologica (TRL4-5), evidenziando difficoltà nel passaggio dalla prototipazione alla diffusione su larga scala; sebbene integri fin dalle fasi iniziali considerazioni su scalabilità e contesto regolatorio il raggiungimento di livelli TRL superiori richiede ulteriori supporti finanziari, norma-

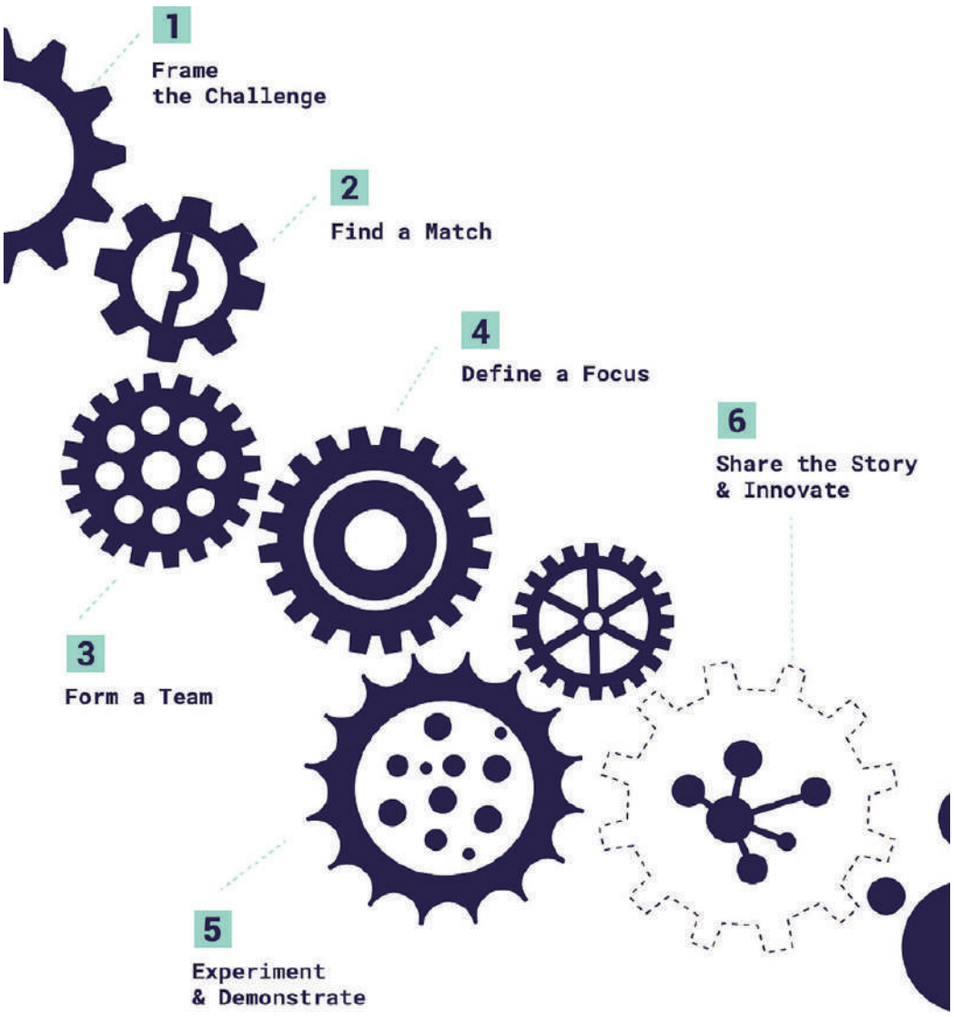


Fig. 5 | Better Factory project method (source: van Vliet et alii, 2024).

Method / framework	Entry point to innovation	Role of artistic practice	Integration of futures thinking	Industrial applicability and TRL	Transferability and main limitations
DFA (MUSAE Factory Model, Horizon Europe, 2022-2025)	Vision-oriented: shared future scenarios are developed before the industrial challenge is defined	Structural co-designer: co-creates future scenarios and co-develops prototypes	Systematic: Horizon Scanning and Visioning are dedicated phases	23 art-technology collaborations; 11 prototypes at TRL5	High: open-source, transferable, and validated in the 'food as medicine' domain; requires medium-to-high innovation maturity
STARTS methodologies (EU STARTS, 2016-ongoing)	Variable: challenge-oriented (art-enabled prototyping), insight-oriented (art-influenced science), and mission-oriented (art-driven technology)	Reframing agent (prototyping), source of insight (science), and responsible validator (technology)	Implicit: not structured; integrated only in the mission-oriented type	No defined TRL; outcomes vary according to the type of collaboration	Medium: typological clarity and broad adoption; lacks an integrated end-to-end innovation pipeline
Art-Driven Innovation Method (In4Art / ADI, Netherlands, 2018-ongoing)	Driven by existing artworks, analysed as starting points for identifying innovation directions	Source of ideas and interpreter of value: artworks reveal the potential of technological and social innovation	Limited: no structured phase for analysis or vision development is provided	Applied in Better Factory; 19 innovation at TRL4–5	High: globally accessible database; limited by dependence on the existing artistic corpus
MAST Innovation Cycle (Erasmus+ EU / University of Nova Gorica, 2018-2020)	Challenge-oriented: a social challenge in which Art Thinking precedes Design Thinking	Epistemic parity between art and design	Weak: no dedicated analysis; future orientation is implicit in the Art Thinking phase	Educational context; TRL not defined; application to SMEs documented only to a limited extent	Medium: strong theoretical argument in favour of art preceding design; predominantly educational; industrial adoption requires adaptation
Better Factory method (H2020, 2020-2024)	Problem-oriented: the existing industrial challenge of SMEs is the starting point; the artist reframes it	Creative reframer and amplifier of solutions: the artist becomes part of the team	No dedicated phase: the market and the challenge context define the future horizon	19 innovations at TRL4-5	High: publication of the guide Creativity Meets Industry; replicable for manufacturing SMEs; limited for anticipatory innovation

Tab. 2 | Comparative analysis of innovation models and of the MUSAE Factory Model (credit: the Authors, 2026).

tivi e istituzionali. In particolare il superamento della soglia TRL5 implica una serie di passaggi critici che eccedono il perimetro attuale del MUSAE Factory Model: 1) validazione dei prototipi in ambienti operativi reali (TRL6-7), ad esempio contesti agricoli diversificati per SOIL o sistemi di biofabbricazione su scala per Growing Futures; 2) ingegnerizzazione e standardizzazione delle soluzioni, necessarie per garantirne replicabilità, affidabilità e conformità normativa; 3) sviluppo di modelli di business sostenibili, capaci di sostenere la transizione da prototipo sperimentale a prodotto o servizio scalabile; 4) accesso a finanziamenti e infrastrutture adeguate per sostenere fasi avanzate di testing e industrializzazione; 5) coinvolgimento di attori istituzionali e regolatori, indispensabile per affrontare vincoli normativi, certificazioni e accettabilità sociale.

Questi passaggi evidenziano una tensione strutturale tra la natura esplorativa e anticipatoria del modello, orientata alla generazione di visioni e prototipi, e i requisiti necessari per la loro implementazione su larga scala, configurando il MUSAE Factory Model come un'infrastruttura abilitante per le fasi iniziali dell'innovazione sistemica, piuttosto che come un dispositivo completo per la sua industrializzazione. La sua efficacia dipende inoltre da specifiche condizioni abilitanti: ecosistemi collaborativi strutturati, competenze interdisciplinari e un livello medio-alto di maturità innovativa delle organizzazioni coinvolte. In assenza di tali condizioni, e in particolare di attori intermedi capaci di facilitare il dialogo, le differenze culturali, temporali e operative tra artisti, tecnologi e imprese possono ostacolare l'efficacia dei processi.

La diffusione del modello è ulteriormente limitata da barriere di natura sistemica, riconducibili a cinque dimensioni principali: culturali, legate alla distanza tra linguaggi e pratiche disciplinari; organizzative, connesse alla difficoltà di integrare processi esplorativi in strutture orientate al breve termine; economiche, relative ai costi e ai tempi delle attività sperimentali; tecnologiche, legate alla complessità e integrazione delle tecnologie emergenti; normative, dovute alla carenza di strumenti regolativi e valutativi adeguati.

Analogamente la trasferibilità del modello oltre il dominio 'cibo come medicina' dipende dalla capacità di adattarne strumenti e processi a contesti applicativi differenti, caratterizzati da diversi livelli di maturità tecnologica, assetti istituzionali e condizioni di mercato. Sebbene la natura 'aperta' e modulare del framework ne favorisca l'adattabilità la sua implementazione efficace richiede la presenza di ecosistemi di innovazione avanzati che non sono uniformemente distribuiti. Questo aspetto rappresenta una barriera significativa alla diffusione del modello in contesti meno strutturati, rendendo necessario sviluppare strategie di adattamento e semplificazione per garantirne un'applicazione più ampia ed equa.

In questo quadro il MUSAE Factory Model mostra un'elevata trasferibilità in contesti caratterizzati da ecosistemi di innovazione avanzati, settori ad alta intensità di conoscenza e organizzazioni aperte alla sperimentazione. Al contrario la sua applicabilità risulta più limitata in contesti a bassa maturità tecnologica, in settori fortemente regolati o in organizzazioni con modelli decisionali rigidi.

Dal punto di vista degli Obiettivi di Sviluppo Sostenibile il contributo del modello si colloca principalmente nell'intersezione tra SDG 9, 12, 13 e 15, con l'SDG 9 come obiettivo abilitante. Il MUSAE Factory Model favorisce sinergie tra innovazione industriale, sostenibilità ambientale e trasformazione dei sistemi produttivi ma rende anche evidenti alcuni compromessi, generando tensioni tra innovazione tecnologica e consumo di risorse, conflitti tra scalabilità e sostenibilità e difficoltà nel bilanciare obiettivi economici e impatti di lungo periodo. Nel complesso questi limiti indicano la necessità di ulteriori sviluppi del modello orientati a rafforzare le connessioni tra sperimentazione, validazione e implementazione, nonché a supportarne l'applicazione in domini e contesti diversi, contribuendo a una più ampia integrazione tra innovazione anticipatoria e processi di trasformazione sistemica.

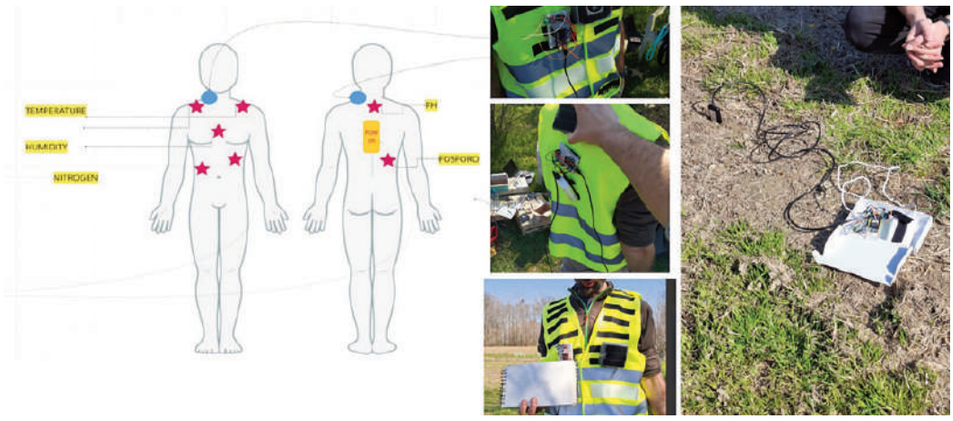
Conclusioni | Il contributo ha analizzato il MUSAE Factory Model come proposta per un'innovazione sistemica capace di integrare pratiche artistiche, sviluppo tecnologico ed esplorazione dei futuri. Più che un modello orientato alla produzione di soluzioni pronte per il mercato, esso opera come dispositivo di orientamento delle traiettorie di innovazione, intervenendo nelle fasi in cui le scelte progettuali restano ancora aperte e reversibili. In questa prospettiva i prototipi sviluppati non rappresentano esiti incompiuti ma strumenti per rendere operative visioni di lungo periodo, facilitare il confronto tra attori eterogenei e testare la coerenza sistemica delle soluzioni emergenti.

Dal punto di vista teorico la ricerca contribuisce al dibattito sull'innovazione per la sostenibilità proponendo un'integrazione tra approcci trasformativi, governance anticipatoria e analisi delle interdipendenze tra SDG, ancora raramente tradotta in dispositivi operativi. Il MUSAE Factory Model mostra come tali dimensioni possano essere incorporate in un framework progettuale strutturato, spostando il ruolo dell'innovazione da fattore di ottimizzazione a leva per la costruzione di sinergie sistemiche e l'anticipazione dei compromessi nelle fasi iniziali del processo. In tal senso il contributo

rafforza una prospettiva emergente nel design e negli studi sull'innovazione che riconosce il valore di approcci anticipatori e transdisciplinari come condizioni necessarie per affrontare sfide sistemiche.

Sul piano metodologico il MUSAE Factory Model propone un'infrastruttura replicabile per la cocreazione transdisciplinare, superando la natura episodica delle collaborazioni arte-tecnologia e integrando costruzione di scenari, esplorazione progettuale e sviluppo prototipale in un processo coerente. Il suo contributo principale risiede nella capacità di connettere immaginazione e operatività, abilitando forme di innovazione orientate al lungo periodo pur mantenendo un ancoraggio a contesti applicativi concreti. Tuttavia tale integrazione rimane ad oggi prevalentemente confinata alle fasi iniziali del processo innovativo, evidenziando la necessità di ulteriori sviluppi per estenderne l'efficacia lungo l'intero ciclo di vita dell'innovazione.

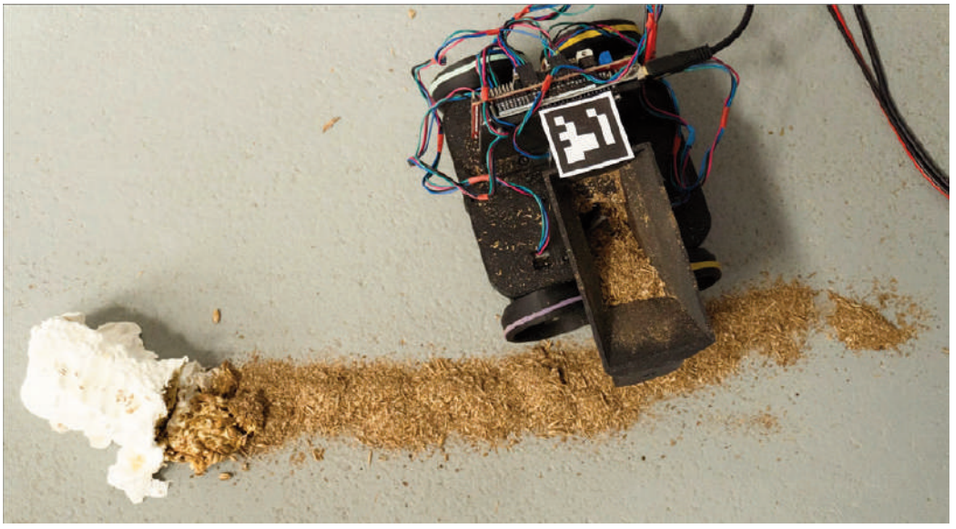
Allo stesso tempo emergono limiti e condizioni di validità rilevanti. Il modello è stato sviluppato in un contesto specifico, infrastrutture EDIH, finanziamenti europei, ecosistemi collaborativi avanzati, che ne condizionano la replicabilità. Inoltre i prototipi si collocano a livelli intermedi di maturità tecnologica (TRL4-5) e il passaggio verso livelli superiori richiede un insieme di condizioni, validazione in contesti reali, ingegnerizzazione, modelli d'impresa, supporto normativo, che eccedono il perimetro del framework. Questa discontinuità evidenzia una tensione strutturale tra la natura esplorativa del modello e le logiche di implementazione su larga scala che rappresenta uno dei principali nodi aperti.

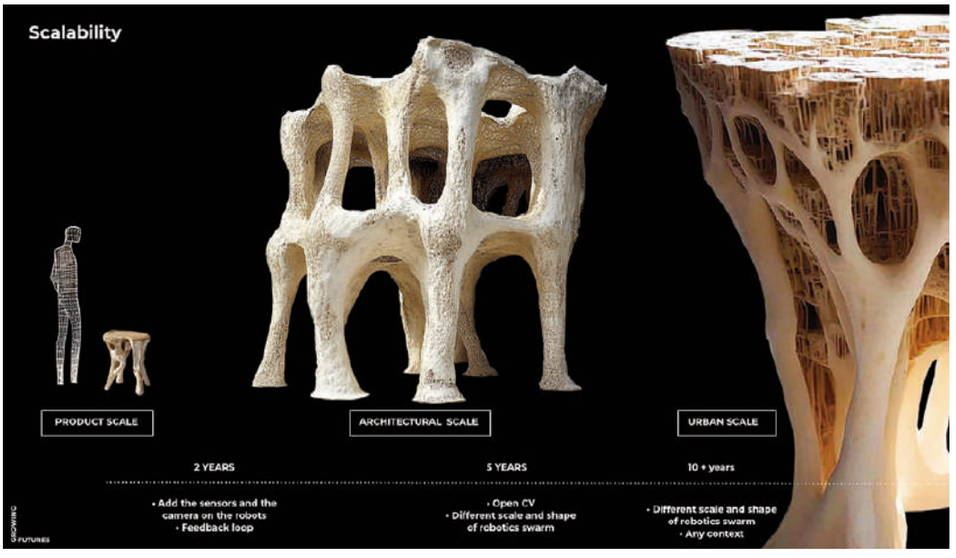






Figg. 6-8 | SOIL: wearable technology for transforming environmental data into sensory experience (credits: L. Artioli and Uptoearth, 2025).







Figg. 9-11 | Growing Futures: bio-responsive habitat prototype capable of adaptation and self-regeneration within ecological cycles (credits: D. Amandolese, Basque Biodesign Centre, 2025).

In questo quadro la ricerca futura potrà svilupparsi lungo quattro direttrici principali: 1) estensione intersettoriale del modello oltre il dominio attuale per verificare la trasferibilità del framework in contesti con diversi livelli di maturità tecnologica e regolatoria, così come in contesti geografici e istituzionali diversi da quello europeo; 2) studi longitudinali per analizzare l'evoluzione dei progetti oltre il TRL5 e comprendere quali traiettorie seguano i prototipi dopo la fase di residenza e in quali condizioni i passaggi verso livelli di maturità superiori diventino praticabili; 3) sviluppo di metriche di impatto, capaci di valutare non solo gli esiti progettuali ma anche gli effetti cognitivi, organizzativi e culturali del modello; 4) integrazione con approcci orientati al mercato, per esplorare configurazioni ibride tra innovazione anticipatoria e implementazione industriale.

Nel complesso il MUSAE Factory Model si configura come un contributo rilevante alla definizione di modelli di innovazione capaci di operare in condizioni di complessità e di incertezza sistemica. La sua proposizione centrale, secondo cui l'innovazione sostenibile richiede non solo efficienza tecnologica ma anche immaginazione culturale, riflessione etica e orientamento ai futuri, non rappresenta un esito consolidato ma un programma di ricerca e sperimentazione ancora aperto.

The first decades of the twenty-first century are increasingly described as a condition of polycrisis (Morin, 2020), in which climate change, biodiversity loss, geopolitical instability, health emergencies, and growing socio-economic inequalities interact in mutually reinforcing ways. Rather than isolated disruptions, these dynamics appear as systemic entanglements that expose the deep fragilities of global production systems and infrastructures. In this context, innovation processes remain central to economic development, technological progress, and social transformation. In international policy agendas, innovation occupies a key position within frameworks such as the United Nations Sustainable Development Goals (SDGs; UN, 2015), the European Green Deal (European Commission, 2019), and the Farm to Fork strategy (European Commission, 2020). In particular, SDG 9 promotes resilient infrastructure, innovation, and inclusive industrialisation, positioning technolog-

ical development as a driver of sustainable transformation. It can therefore be interpreted not only as a sectoral goal, but also as a transversal lever capable of influencing multiple dimensions of sustainability.

Despite these ambitions, progress towards the targets of the 2030 Agenda remains uneven. Less than five years before the deadline, the United Nations Sustainable Development Goals Report 2023 (UN, 2023) indicates that only around 15% of targets are on track, while progress on more than one third has stalled or regressed compared with 2015 levels. The Covid-19 pandemic, the acceleration of the climate crisis, geopolitical conflicts, and growing economic inequalities have eroded the progress achieved over the previous decade. The challenge no longer lies simply in accelerating the implementation of the goals, but in rethinking the innovation systems through which development is conceived and enacted: as documented by the OECD (2024), the slowest progress is being recorded precisely in those goals that require structural transformations of production systems and innovation cultures, rather than incremental improvements alone.

As the literature on 'deep socio-technical transitions' has shown (Schot and Steinmueller, 2018), sustainability entails long-term transformations that go far beyond incremental technological improvements. However, dominant innovation models remain largely anchored in linear research and development logics, oriented towards short-term optimisation and market competitiveness. These approaches tend to conceive innovation as a technical exercise in problem-solving, often disconnected from broader socio-ecological dynamics and insufficiently attentive, to long-term issues of equity, governance, and environmental impact (Stirling, 2015; OECD, 2018). As a result, they struggle to engage with synergies and trade-offs across different SDGs.

The acceleration of digital transformation further intensifies these tensions. Artificial intelligence, advanced manufacturing, robotics, and data infrastructures offer unprecedented opportunities, but, if embedded in extractive models or oriented solely towards growth, they risk amplifying resource consumption and social inequalities. In response, the European Industry 5.0[1] framework proposes a paradigm shift that moves beyond an automation-centred understanding of efficiency and places human beings, sustainability, and resilience at the centre as guiding principles of industrial transformation (European Commission, 2021), thereby reframing innovation as a value- and mission-oriented process.

Such a shift requires innovation models capable of enabling forms of anticipatory governance by integrating futures exploration, ethical reflection, and collective deliberation into technological development processes (Guston, 2014; Ahern, 2025; Tõnurist and Hanson, 2020). Anticipatory innovation entails the ability to collectively imagine, discuss, and negotiate visions, and to steer technological trajectories more deliberately. From this perspective, artistic practices and design can help expand the cognitive and cultural dimensions of innovation by challenging dominant assumptions and exploring alternative trajectories (Purg, Cacciatore and Gerbec, 2023). Despite this potential, art-technology collaborations often remain episodic and lack stable methodological structures (EUNIC, 2019), limiting their impact within industrial innovation processes.

A central methodological question therefore emerges: how can these anticipatory dimensions be systematically integrated into industrial innovation processes, rather than remaining marginal or residual? Instead of being regarded as a purely technical objective, SDG 9 can be reinterpreted as an enabling infrastructure for systemic transitions, in which industrial innovation evolves in dialogue with ecological limits, social equity, and cultural imagination.

Against this background, the contribution aims to analyse the MUSAE Factory Model, developed through the European MUSAE project, as an open-source methodological infrastructure for systemic, futures-oriented innovation driven by the integration of art and technology. More specifically, the article seeks to: a) discuss the limitations of dominant innovation models in relation to the complexity of sustainable transitions; b) present the MUSAE Factory Model and the Design Futures Art-driven (DFA) method; c) analyse its application through case studies in the 'food as medicine' context; and d) assess the contribution of the model in managing synergies and trade-offs among the SDGs. In this contribution, SDG 9 is considered an enabling goal that supports the integration of SDGs 12, 13, and 15, which are directly addressed through the case studies presented and through the MUSAE Factory Model.

The paper is structured in four parts: the first section reconstructs the state of the art on innovation models for sustainable development; the second presents the MUSAE Factory Model and the DFA method; the third analyses the model and compares it with other methodologies; and the fourth discusses limitations, transferability, and implications in relation to the SDGs. The article contributes to the scientific debate by proposing an integrated and transferable model that combines artistic practices, futures exploration, and technological development, offering operational tools to address the complexity of sustainable transitions under conditions of uncertainty.

Innovation models for sustainable development | Innovation research recognises that addressing sustainability challenges requires profound systemic transformations of socio-technical configurations, rather than simple incremental technological upgrades. Industrial production systems and innovation ecosystems shape resource flows, economic opportunities, and forms of social inclusion. From this perspective, SDG 9 can be interpreted as a structural matrix capable of guiding the transition towards more resilient and sustainable industrial and infrastructural ecosystems, generating cascading effects across multiple other SDGs.

In recent years, several conceptual frameworks have emerged in response to this need for systemic transformation. The literature on 'transformative innovation policy' proposes a shift from traditional support for research and development and competitiveness towards long-term socio-technical transitions aligned with major societal challenges and long-term public value (Schot and Steinmueller, 2018). Similarly, 'mission-oriented innovation' models promote coordinated efforts among public and private actors to address large-scale challenges, such as climate neutrality or the transformation of food systems (Mazzucato, 2018), while approaches grounded in 'responsible research and innovation' emphasise anticipation, reflexivity, inclusion, and responsiveness as key principles for innovation governance (Nazarko, 2019).

Although these models represent a significant evolution beyond linear research and development paradigms, they still present relevant gaps, as highlighted by a rapidly expanding literature on sustainable transitions and systemic innovation. Many transformative frameworks focus predominantly on policy coordination and technological scalability, overlooking the cultural and imaginative dimensions needed to operate under conditions of uncertainty and value conflict. Moreover, although they recognise synergies among sustainability goals, they often lack operational tools capable of explicitly addressing trade-offs and synergies among the SDGs at the level of collaborative experimentation. Finally, as recent studies on open innovation and sustainable transitions have shown, innovation ecosystems often remain fragmented, with limited integration among technological actors, creative disciplines, and civil-society stakeholders. This is compounded by growing attention in the recent literature to open innovation and co-creation practices as levers for addressing systemic complexity (Barbero and Ferrulli, 2023), since they have transformed processes of knowledge production and value creation by defining a paradigm in which firms combine internal and external knowledge through distributed collaborations (Bogers, Chesbrough and Moedas, 2018; Nambisan, Wright and Feldman, 2019). However, some critiques point to a tendency to privilege technological scalability and market efficiency over ethical reflection, long-term sustainability, and inclusive forms of governance (Bogers, Chesbrough and Moedas, 2018). In parallel, studies on design for sustainability and socio-ecological transition have expanded their scope, stressing the need to integrate systemic approaches (Irwin, 2015; Tonkinwise, 2015; Zannoni et alii, 2024), regenerative practices (Escobar, 2018), and circular models into innovation processes (Ceschin and Gaziulusoy, 2016).

In summary, many innovation ecosystems still struggle to translate high-level policies into operational methodologies capable of coordinating interdisciplinary collaboration and experimental processes: integrating technological development, cultural reflection, ethical considerations, and long-term visions continues to represent a structural challenge for industrial systems.

The Industry 5.0 paradigm further reinforces this trajectory by emphasising the need for human-centred, resilient, and sustainable innovation systems. However, operationalising these principles requires concrete methodological infrastructures capable of integrating futures exploration, ethical reflection, and cross-sector collaboration into industrial processes. The literature on anticipatory governance stresses that innovation should move from reactive problem-solving to the proactive exploration of alternative futures, embedding collective practices of vision-building within decision-making processes (Guston, 2014; OECD, 2018). Within this framework, interdisciplinary approaches that connect technological research with artistic and cultural practices are gaining relevance.

Art-technology collaborations have shown the capacity to activate critical reflection, expand imaginaries, and challenge dominant narratives of progress (Whitaker, 2016; Minski, 2020), helping to make visible the social and ethical implications of technological development through experimental, narrative, and prototypical practices. From this perspective, recent research has shown that integrating emotional technology and narrative practices can raise users' awareness of complex issues such as sustainable transition (Valenti et alii, 2024).

In recent years, these approaches have intersected with the growing field of art-tech practices and collaborations between cultural and creative industries and technological sectors, highlighting the role of culture as an infrastructure for innovation (Klein, Gerlitz and Spychalska-Wojtkiewicz, 2021; Dolejsova et alii, 2021), although the literature stresses that these practices often remain marginal to dominant industrial models and are rarely integrated into structured and scalable processes.

These practices intersect with the emerging field of Design Futures, which integrates design methodologies and futures studies to explore long-term social transformations (Bühring and Liedtka, 2018). Design Futures approaches (Canina and Monestier, 2023) use speculative scenarios, participatory vision-building, and narrative prototyping to investigate possible and desirable futures, enabling organisations to anticipate emerging challenges and explore alternative trajectories of technological development (Candy and Dunagan, 2017; Dunne and Raby, 2013). These approaches, which are increasingly widespread in policy and public innovation contexts, foster critical reflection on the systemic implications of technological development and help integrate temporal, ethical, and cultural dimensions into decision-making processes.

Despite their potential, these art-driven methodologies often remain peripheral within dominant industrial frameworks and lack structured implementation models, while futures-oriented thinking is rarely embedded as a continuous operational component of innovation processes (Miller, 2018). Many collaborations among artists, designers, and technologists develop in temporary and experimental settings, without methodologies capable of generating long-term impacts (Monestier et alii, 2024; Schnugg and Song, 2020); consequently, their contribution to systemic transitions towards sustainability remains fragmented and only partially integrated into mainstream innovation processes.

This limitation is accompanied by the restricted availability of evaluative models capable of measuring the impact of interdisciplinary practices on sustainable transitions, an issue that is increasingly relevant in recent literature on the evaluation of socio-technical transformations and SDG impact (Nilsson, Griggs and Visbeck, 2016; Pham-Truffert et alii, 2020).

Addressing the complex synergies among the SDGs therefore requires not only creative experimentation, but also methodological infrastructures capable of coordinating interdisciplinary collaboration. This need is made even more urgent by the fact that the SDGs facing the greatest difficulties – SDGs 13, 14, and 15, but also SDGs 2 and 3 – are those that require deep cultural and systemic transformations, not merely technical solutions.

The slowdown in progress documented by the UNDRR Global Assessment Report (2022) indicates that the increasing frequency of extreme climate events is eroding the infrastructures and production systems on which many other goals depend, creating a dynamic of negative interdependence that linear innovation models struggle to address. The challenge, then, is not simply to promote interdisciplinary experimentation, but to design an innovation infrastructure that systematically integrates futures exploration, artistic inquiry, and technological development within a coherent and replicable framework.

In this context, the contribution seeks to bridge the gap between experimental approaches and systemic applications by introducing three elements of discontinuity with the existing literature: first, the MUSAE Factory Model introduces a structured integration between artistic practices and industrial innovation, moving beyond the episodic nature of art-tech collaborations; second, the DFA method adopts 'futures thinking' as an operational device to orient innovation processes under conditions of uncertainty; and third, it proposes a shift from temporary collaboration models to a transferable methodological infrastructure capable of sustaining systemic and replicable innovation processes across different contexts.

MUSAE Factory Model | The Horizon Europe MUSAE project (2022-2025), embedded in the STARTS ecosystem, explored the contribution of art-technology collaboration to sustainable innovation centred on people and the planet, while also strengthening the role of European Digital Innovation Hubs (EDIHs). Its focus was the 'food as medicine' domain, characterised by strong synergies with SDGs 3, 9, 12, and 13. Through two art-technology residency programmes, MUSAE involved 23 artists and 11 small and medium-sized enterprises (Fig. 1), producing twelve future scenarios and eleven prototypes developed up to Technology Readiness Level 5, understood as the validation of a complete prototype in a relevant environment, as confirmed by the assessment of the technological partners of the MUSAE consortium, tests with end users, and the public exhibition at the Palace of Science in Belgrade.

Artistic collaboration was conceived as a strategic component of the process: typical barriers – including communication gaps, the absence of shared methodologies, and the misalignment of objectives – were addressed through a replicable methodological framework capable of balancing creative freedom and procedural rigour. The main outcome of this pathway is the MUSAE Factory Model: an open-source framework for systemic and futures-oriented innovation, aligned with the principles of Industry 5.0.

The Factory Model is not configured as a single method, but as an integrated ecosystem (Fig. 2) articulated around three main components: 1) Methodological resources, centred on the Design Futures Art-driven (DFA) method and its related tools; 2) Organisational resources, including residency formats, open calls, training guidelines, and mentoring activities; and 3) Community resources, namely the network connecting artists, enterprises, technologists, educators, and domain experts. This architecture responds to the lack of frameworks capable of supporting long-term art-technology collaborations: by integrating the artistic process within a structured methodology and collaborative digital environments (such as Figma[2] and Miro[3]), the model transforms creative experimentation into a replicable operational sequence.

At the centre of the Factory Model is the DFA method (Efremenko et alii, 2025), which integrates three complementary practices: Futures Thinking, to explore alternative and preferable futures; Design Thinking, to structure iterative processes oriented towards prototyping; and Art Thinking, to introduce critical, imaginative, and emotional dimensions (Fig. 3). Based on the Double Diamond model (Design Council, 2005) and extended through Voros's 'futures cone' (2003), the method is articulated in four phases: trend analysis, visioning, ideation, and prototyping. The first phase analyses emerging signals and systemic challenges; the second builds shared scenarios; the third develops interdisciplinary concepts by expanding the space of possibilities; and the fourth translates ideas into prototypes developed up to TRL5.

Generative AI is used as a creative collaborator in ideation, visualisation, and narrative processes. The originality of the method lies in its capacity to respond to three limitations of dominant innovation models:

1) From problem to vision – the DFA moves beyond a problem-centred approach and starts the process from shared visions of preferable futures, making it possible to assess ex ante the technological, environmental, and social implications, and to orient choices towards outcomes consistent with long-term sustainability;

2) Managing synergies and trade-offs among the SDGs – it integrates systemic tools (STEEP+V, mapping of stakeholders, including non-human stakeholders, and uncertainty matrices) that make interdependencies, synergies, and trade-offs among the SDGs explicit, encouraging anticipatory discussion of impacts and moving beyond purely anthropocentric logics;

3) Integrating cultural and emotional intelligence – the DFA, together with the MUSAE Factory Model, responds to one of the main gaps in contemporary innovation systems by reintegrating cultural, ethical, and ecological dimensions into innovation processes, configuring itself as a cognitive and collaborative infrastructure for Industry 5.0 and orienting innovation towards systemic and responsible trajectories.

Positioning the MUSAE Factory Model within the landscape of art-technology innovation models | In order to critically analyse the MUSAE Factory Model, the contribution adopts an approach that distinguishes among: a) the methodological model under analysis; b) the case studies developed within it, used as applied evidence; and c) international reference models and frameworks, used for critical comparison. This analysis positions the MUSAE Factory Model and the related DFA method within existing frameworks for art-technology collaboration and structured methodologies for industrial innovation.

The selection of international references was based on the following criteria: a) integration between creative practices and technological innovation; b) presence of futures-oriented or anticipatory approaches; c) relevance to the debate on sustainability and socio-technical transitions; d) level of methodological structuring; and e) potential for transferability and replicability.



Fig. 12 | Sprout to Flourish: interactive simulations for the transition towards regenerative agricultural practices (credit: M. Mojsiejuk and Odd Data & Design studio, 2025).

Four methods or frameworks were selected. The first, the S+T+ARTS Initiative, developed three collaborative modes, Art-Enabled Prototyping, Art-Influenced Science, and Art-Driven Technology (van Vliet, 2020), which structure the interaction among artists, scientists, and industry. Although they represent an advance beyond previously informal collaborations, these typologies function mainly as facilitation tools and do not amount to operational innovation pathways, since they lack explicit 'futures thinking' phases and a systematic connection between artistic experimentation and prototyping at defined TRL levels.

The second is the Art-Driven Innovation method (ADI; Fig. 4; In4Art, 2020), which uses databases of artworks as a starting point for responsible innovation, connecting technologies and SDGs through 'green' and 'care' pathways. Although strongly oriented towards sustainability, it starts from existing works rather than from co-created future visions, which in some cases limits its generative capacity in highly uncertain contexts.

The MAST innovation cycle (Tab. 1), developed within the Erasmus+ programme and selected as the third case, places Art Thinking before Design Thinking in a ten-stage process (Castillo-Rutz and Purg, 2021). Although it emphasises the central role of artistic inquiry, it remains primarily an educational model, with limited documented application in industrial contexts and without clear references to TRLs.

The last is the Better Factory project (Fig. 5; van Vliet et alii, 2024), which is the closest to the MUSAE model because it structures collaborations among artists, small and medium-sized enterprises, and technologists in four phases: challenge definition, 'matchmaking', iterative experimentation, and business modelling. However, it adopts a problem-driven approach and does not include a structured phase of futures-oriented thinking. To systematise the comparison between the MUSAE Factory Model and the main international frameworks, a comparative synthesis was developed around five dimensions: entry point to innovation, role of artistic practice, integration of futures thinking, industrial applicability, and transferability. Table 2 summarises these differences, highlighting the positions and strengths and limitations of the various approaches.

Within this framework, the SOIL and Growing Futures projects are analysed as applied cases of the MUSAE model, while the critical comparison is developed in relation to related international models and practices. The comparison shows that the MUSAE Factory Model is distinguished by the simultaneous integration of three dimensions that are rarely present together in the models analysed: 1) a vision-oriented entry point based on the shared construction of future scenarios; 2) an explicit methodological formalisation that structures the process into replicable phases; and 3) an operational connection with industrial contexts that makes it possible to translate speculative visions into prototypes at intermediate TRL levels.

Conversely, the models analysed tend to develop these dimensions only partially: STARTS methodologies privilege flexibility but lack structured operational pathways; ADI introduces a strong sustainability orientation but limits future generativity; MAST emphasises the role of art but remains confined to educational contexts; and Better Factory ensures industrial applicability but adopts a predominantly problem-driven approach, lacking an explicit anticipatory phase.

Two main implications emerge from this reading: first, futures-oriented thinking is systematically underused as an operational device in innovation processes, despite its potential for managing uncertainty and complexity; second, vision-oriented and problem-driven models appear complementary, since the former enables long-term transformations, while the latter facilitates short-term industrial adoption. The MUSAE Factory Model is positioned within this tension, proposing an integration between the anticipatory dimension and operational application. Some strengths and limitations shared with the literature nevertheless re-

main, particularly in relation to the scalability of the model, large-scale validation, and the measurement of long-term impacts, all of which require further methodological and empirical development. The following sections analyse how the framework was operationalised in the MUSAE residencies, with particular attention to the two representative projects SOIL and Growing Futures, showing how SDG 9 can act as a systemic enabler of sustainable industrial transformation.

Applied cases of the MUSAE Factory Model: SOIL and Growing Futures | In line with the contribution's positioning in relation to the SDGs, in which the analysis identified a prevailing convergence towards the intersection of SDGs 9, 12, 13, and 15, with SDG 9 understood as an enabling goal, the selection of case studies was oriented towards making these relationships explicit through applied evidence. It is important to clarify that the criteria used for case selection derive directly from the evaluation system developed by the MUSAE consortium to assess the completeness and quality of the eleven projects produced. These criteria were communicated from the outset to the participating teams, who were required, through the five expected deliverables, to demonstrate their effective fulfilment throughout the entire development process. The selection of SOIL and Growing Futures therefore responds to consolidated evaluative criteria. Both projects obtained the highest scores in the two main evaluation phases of the MUSAE project: concept evaluation and final prototype evaluation. The first considered seven dimensions: concept maturity, technology, user experience, collaboration, ethics, sustainability, and financial feasibility, while the second certified the achievement of TRL5 on the basis of four main areas: positive impact (sectoral, social, and environmental), innovation, user interaction, and risk management. The material assessed included both the functioning TRL5 prototypes and the five final deliverables produced by the teams, which systematically document the development process.

Within the MUSAE project, TRL5 indicates the achievement of a complete prototype validated in a relevant environment through a structured, shared process involving the entire technological consortium and validation with end users. More specifically, validation involved farmers in the case of SOIL and designers in the case of Growing Futures. However, it must be specified that this level does not correspond to validation in a real operational environment (TRL6-7), which would require large-scale testing, advanced engineering, and certification, but rather to validation under simulated or controlled conditions, which are sufficient to demonstrate the technical feasibility and coherence of the prototype in relation to criteria of impact, usability, and sustainability.

The two cases were also selected for their capacity to represent the central dimensions of the model in complementary ways. SOIL exemplifies the relationship among future vision, environmental sensing, and regenerative agricultural practices, with a strong connection to SDGs 13 and 15. Growing Futures instead illustrates the integration of biofabrication, advanced robotics, and post-anthropocentric design, with direct relevance to SDGs 9 and 12. Considered together, the two cases show how the DFA can generate transformative rather than incremental innovation trajectories in contexts characterised by high ecological and technological uncertainty.



Fig. 13 | Remedy Garden: bio-inclusive architecture for the urban cultivation of medicinal plants (credit: Baum & Leahy and Blast Studio, 2025).

At the same time, they make it possible to delineate more precisely what the MUSAE Factory Model has actually demonstrated, namely the capacity to guide art-technology collaborations up to the development of mature and validated prototypes, as distinct from what remains potential to be developed in subsequent phases, particularly the transition towards higher levels of technological maturity and stable forms of industrial adoption and large-scale diffusion.

SOIL: regenerative agriculture | The SOIL project (2025), the result of collaboration among the artist Letizia Artioli, the company Uptoearth, a farmer, and a fashion designer, addresses soil degradation, one of the major environmental challenges of the contemporary age, closely linked to biodiversity loss, climate change, and unsustainable models of food production. The project originates from the future scenario 'Soil Skinships'[4], developed by Lisa Mandemaker, which imagines a sensory relationship between humans and soil mediated by technological devices. In keeping with the DFA, the project starts from a shared vision of the future rather than from a predefined technical problem. Through speculative exploration, soil is reinterpreted as a living infrastructure embedded in complex socio-ecological systems. The outcome is a wearable prototype that translates soil data into sensory stimuli perceptible by the human body. The device integrates environmental sensors capable of detecting parameters such as humidity, temperature, and other soil conditions (Figg. 6-8); the data collected are converted into tactile and sound signals that are perceived directly by the farmer through the garment, thereby transforming abstract measurements into an embodied experience. The project proposes an alternative paradigm in which agricultural infrastructure becomes relational and experiential, moving beyond models based exclusively on remote control. In this way, through innovation, SOIL supports regenerative agricultural practices, strengthens ecological awareness, and integrates technological and environmental dimensions.

Growing Futures: regenerative habitats between mycelium and robotics | The Growing Futures project (2025) explores the relationships among biological materials, robotic fabrication, and regenerative design. Developed by the artist and designer Daniela Amandolese with the Basque Biodesign Center, the project investigates how biological growth processes and advanced fabrication technologies can be combined to generate new forms of sustainable infrastructure. It is based on the scenario 'What the World Eats – Agro-Technologies in Earthly Futures'[5], developed by Peter Andersen, which imagines hybrid infrastructures between biological and technological systems operating symbiotically. Here too, the project starts from a future vision, questioning the separation between natural and artificial and reinterpreting infrastructure as a living system.

The project combines the biological growth of mycelium with robotic fabrication: robotic systems guide and shape mycelial development, replicating natural reticular structures and enabling the creation of complex spatial forms. The result is a bioresponsive habitat prototype capable of adapting and self-regenerating, while integrating into ecological cycles (Figg. 9-11). The project highlights a shift towards post-anthropocentric approaches, in which natural and technological processes operate in an integrated manner.

Managing synergies and trade-offs through an art-driven model | Although the two projects operate in different fields, they share the same methodological logic of the MUSAE Factory Model. In both cases, innovation starts from shared future scenarios that reconfigure infrastructure as a living and relational system. This approach moves beyond a linear and solutionist logic in favour of anticipatory reframing: instead of optimising efficiency within consolidated industrial paradigms, the DFA method expands the problem space through perspective analysis and visioning practices, before converging in the prototyping phase.

Without these phases, the projects would probably have followed conventional technological trajectories, leading to incremental rather than transformative outcomes. The comparison discussed above clarifies this point: the DFA is among the few approaches that use future scenarios as a generative device within the process, while other frameworks operate on predefined challenges or existing content.

The model responds to the fragmentation of innovation ecosystems by integrating technological, ecological, and cultural dimensions into a single process. Artists act as co-designers of innovation trajectories, challenging dominant industrial assumptions and fostering broader cross-sector dialogue. For these reasons, the DFA method was selected for the ADI Design Index 2025 as one of the most relevant Italian design research projects in the Research for Enterprise category[6]. This recognition confirms the growing relevance of innovative, anticipatory, and imaginative approaches in industrial and business innovation.

The most significant aspect concerns the reconfiguration of innovation as a lever for systemic transitions towards sustainability. From this perspective, innovation is no longer a source of externalities that undermine other goals, but becomes the means through which synergies can be built. What distinguishes these cases is not only their alignment with multiple SDGs, but also the concrete integration of their synergies into the innovation process. Through futures-oriented reflection, the DFA enables stakeholders to anticipate potential trade-offs between technological acceleration and ecological integrity, and to reorient design trajectories accordingly. The added value of the model lies less in the individual prototypes than in its capacity to transform innovation processes and cultures by proposing a transferable methodological infrastructure.

This capacity to generate and make these dynamics visible emerged particularly clearly in the final exhibition of the MUSAE project, 'Grow, Cook, Code – Rethinking Food Futures', hosted at the Palace of Science in Belgrade. The event functioned not only as a showcase for the results, but also as a device for public and social validation: more than 2,000 visitors, including citizens, artists, enterprises, researchers, and institutions, interacted with 11 functioning prototypes, exploring their potential and strengths and limitations.

This public dimension has methodological relevance for at least three reasons: first, direct interaction made it possible to test the intelligibility of the design visions, transforming complex technological objects into mediation tools among different domains; second, it helped strengthen trust in emerging technologies by highlighting their orientation towards social and ecological goals; and third, it made tangible the potential of the MUSAE Factory Model as an infrastructure not only for industrial innovation, but also for public participation in technological trajectories, in line with anticipatory governance approaches.

The prototypes exhibited demonstrated how existing technologies can be recombined through futures-oriented visions to address systemic challenges in the 'food as medicine' domain. Among them, Sprout to Flourish supports the transition towards regenerative agricultural practices through interactive simulations (Fig. 12); Remedy Garden proposes a bio-inclusive architecture for the urban cultivation of medicinal plants (Fig. 13); Neuro-cooking uses biofeedback to transform cooking into a therapeutic experience (Fig. 14); and Nourish connects nutrition and cognitive states through EEG analysis (Fig. 15).

Taken together, these examples show how the MUSAE Factory Model and the DFA method are capable of generating distinct yet coherent innovation trajectories, combining methodological structure and creative exploration – a productive tension that represents one of the most distinctive elements of the model.

Towards regenerative and anticipatory innovation systems | The persistent gap between the ambition of the SDGs and the uneven progress recorded towards 2030 points not only to difficulties of implementation, but also to structural limitations rooted in dominant innovation cultures and models. Conventional techno-economic paradigms, often oriented towards the short term and characterised by fragmentation and limited anticipatory capacity, struggle to address the systemic synergies and trade-offs that cut across the entire SDG agenda. The MUSAE Factory Model responds to this need by introducing a framework that integrates speculative imagination, structured anticipation, and collaborative prototyping. Through the DFA method, innovation is reoriented around shared visions of preferable futures, rather than being bound exclusively to predefined technical parameters.

The cases analysed show how these approaches can integrate ecological and technological dimensions and support more coherent innovation trajectories. Within this framework, the model contributes to realigning technological development and sustainability by proposing an operational approach in contexts of systemic uncertainty.

To prevent reference to the SDGs from remaining purely declarative, it is necessary to make explicit the contribution of the MUSAE Factory Model in relation to the full SDG 1-17 system. From this perspective, the model does not act linearly on individual goals, but as a device for anticipatory innovation capable of activating synergies, making trade-offs visible, and orienting design trajectories in relation to a plurality of SDGs.

Table 3 proposes a systematic mapping of this relationship, articulated into five analytical categories: directly activated SDGs, indirectly involved SDGs, potentially synergistic SDGs, SDGs asso-



Fig. 14 | Neuro-cooking: biofeedback system applied to the therapeutic culinary experience (credit: A. Rosinke and mbraintrain, 2025).

ciated with risks or trade-offs, and SDGs that are marginal to the scope of the model. The 'directly activated' SDGs are those for which the model produces demonstrable contributions through the exemplary projects and the methodological structure. The 'indirectly involved' SDGs are those that benefit from the model's spillover effects without being its explicit objective. The SDGs with 'possible synergies' are those for which the model shows a potential connection, conditioned by the application context or by future developments.

The SDGs for which 'trade-offs or risks' may emerge are those for which technological innovation guided by the model may generate unresolved tensions or externalities. Finally, the 'marginal or not directly relevant' SDGs are those that fall outside the scope of application of the model in the cases analysed, although they are not excluded in principle from future applications in other domains. The aim is not to claim extensive SDG coverage, but to make the effective relationships between the model and the sustainability agenda explicit and well argued.

It is finally important to specify that this mapping refers to the current configuration of the MUSAE Factory Model, developed in the 'food as medicine' domain and validated through the eleven prototypes produced, including SOIL and Growing Futures. The transferability of the model to other domains could modify its relevance profile in relation to the SDGs, expanding the areas of direct activation or introducing new potential trade-offs.

Limits, barriers, and transferability of the model | Despite the transformative potential of the MUSAE Factory Model, several relevant strengths and limitations emerge in relation to the scalability and transferability of the results. The prototypes developed in the cases analysed are predominantly positioned at TRL5, corresponding to validation in a relevant environment, but still distant from stable forms of industrial adoption. A preliminary conceptual clarification is therefore needed in order to interpret the limits of the model correctly.

The MUSAE Factory Model is not conceived as a product-development pathway oriented towards immediate commercialisation, nor do TRL5 prototypes represent pre-industrial versions of products or services ready for the market. The objective of the model is different and, in some respects, more ambitious at the systemic level: to imagine possible and preferable future trajectories, identify emerging challenges, map interdependencies among technological, ecological, and social dimensions, and anticipate impacts and trade-offs before innovation trajectories consolidate into forms that are difficult to reverse. From this perspective, the prototypes are not unfinished products, but cognitive and cultural devices: tools for making otherwise abstract visions tangible, facilitating dialogue among heterogeneous stakeholders, and testing the internal coherence of an idea against criteria of sustainability, usability, and ethics.

This distinction is relevant not only for assessing the model correctly, but also for avoiding a frequent misunderstanding in the innovation literature, which tends to measure the value of a creative process by its proximity to the market. The MUSAE Factory Model operates at a different level of the innovation chain: that of oriented exploration, where the central question is not 'is this product marketable?' but 'is this vision desirable, sustainable, and technically feasible?' Any subsequent move towards higher TRLs and forms of industrial adoption is possible, but it requires conditions, actors, and resources that lie outside the perimeter of the model itself and that, in this reading, constitute not an intrinsic limitation, but a conscious methodological choice consistent with an anticipatory governance approach to innovation (Guston, 2014).

The MUSAE Factory Model highlights the potential of an integrated approach among art, technology, and 'futures thinking', but also reveals structural limits and conditions of validity linked to the context in which it was developed. In particular, the model emerged under specific conditions: Horizon Europe funding, the 'food as medicine'



Fig. 15 | Nourish: connection between nutrition and cognitive states through EEG analysis (credit: S. Šikoparija and StarLab, 2025).

domain, an infrastructure based on European Digital Innovation Hubs (EDIHs), and a European context favourable to art-technology collaboration, all of which are decisive and not always replicable.

The model is located primarily at intermediate levels of technological maturity (TRL4-5), highlighting difficulties in the transition from prototyping to large-scale diffusion. Although it integrates considerations of scalability and regulatory context from the early phases, reaching higher TRL levels requires further financial, regulatory, and institutional support.

In particular, moving beyond the TRL5 threshold implies a series of critical steps that exceed the current perimeter of the MUSAE Factory Model: 1) validation of prototypes in real operational environments (TRL6-7), for example diversified agricultural contexts for SOIL or scaled biofabrication systems for Growing Futures; 2) engineering and standardisation of the solutions, necessary to ensure replicability, reliability, and regulatory compliance; 3) development of sustainable business models capable of supporting the transition from experimental prototype to scalable product or service; 4) access to adequate funding and infrastructure to support advanced testing and industrialisation phases; and 5) involvement of institutional and regulatory actors, which is essential for addressing regulatory constraints, certification, and social acceptability. These steps reveal a structural tension between the exploratory and anticipatory nature of the model, oriented towards the generation of visions and prototypes, and the requirements needed for their large-scale implementation, configuring the MUSAE Factory Model as an enabling infrastructure for the early phases of systemic innovation, rather than as a complete device for its industrialisation. Its effectiveness also depends on specific enabling conditions: structured collaborative ecosystems, interdisciplinary competences, and a medium-to-high level of innovation maturity among the organisations involved. In the absence of these conditions, and particularly of intermediary actors capable of facilitating dialogue, the cultural, temporal, and operational differences among artists, technologists, and enterprises may hinder the effectiveness of the processes.

The diffusion of the model is further limited by systemic barriers attributable to five main dimensions: cultural, linked to the distance between disciplinary languages and practices; organisational, connected to the difficulty of integrating exploratory processes into short-term-oriented structures; economic, relating to the costs and timeframes of experimental activities; technological, associated with the complexity and integration of emerging technologies; and regulatory, due to the lack of adequate regulatory and evaluative tools.

Similarly, the transferability of the model beyond the 'food as medicine' domain depends on the capacity to adapt its tools and processes to different application contexts, characterised by varying levels of technological maturity, institutional arrangements, and market conditions. Although the 'open' and modular nature of the framework supports its adaptability, effective implementation requires the presence of advanced innovation ecosystems, which are not uniformly distributed. This aspect represents a significant barrier to the diffusion of the model in less structured contexts, making it necessary to develop strategies of adaptation and simplification to ensure broader and more equitable application.

Within this framework, the MUSAE Factory Model shows high transferability in contexts characterised by advanced innovation ecosystems, knowledge-intensive sectors, and organisations open to experimentation. Conversely, its applicability is more limited in contexts with low technological maturity, in highly regulated sectors, or in organisations with rigid decision-making models. The model therefore needs to be adapted according to the context, sector, and maturity level of the reference ecosystem.

From the perspective of the Sustainable Development Goals, the contribution of the model is located mainly at the intersection of SDGs 9,

SDG	Relationship with MUSAE	Rationale
	Indirect	Possible indirect effects on reducing economic vulnerability through inclusive innovation and new models of local production. The model involves SMEs and creative actors in collaborative processes that may contribute to generating economic opportunities and strengthening territorial ecosystems, with potential effects on socio-economic resilience. However, access to the model depends on specific enabling conditions, such as European funding, EDIH infrastructures, and advanced innovation ecosystems, which limit its redistributive scope, particularly in more fragile contexts. Poverty reduction is not an explicit objective of the model, but emerges as a possible indirect effect whose realisation requires targeted adaptation and inclusion strategies.
	Indirect / synergistic	Indirect connection with sustainable food systems and food security. The 'food as medicine' application domain, together with the SOIL and Growing Futures cases, addresses issues relevant to SDG 2, particularly through attention to soil health, the regeneration of agricultural ecosystems, and the development of alternative biological materials, which intersect with structural dimensions of food vulnerability and production sustainability. However, the model does not intervene directly in the causes of hunger or in mechanisms of food access and distribution; its application to the food system remains primarily oriented towards technological and design innovation rather than food security in the strict sense.
	Indirect	Relevant to the 'food as medicine' domain, but not directly demonstrated by the cases. SDG 3 provides the thematic reference for the MUSAE programme as a whole, which operates in the 'food as medicine' domain and assumes health as a horizon of meaning and as an interpretative framework for design activities. However, in the SOIL and Growing Futures cases analysed in this contribution, the connection with human health is not supported by direct empirical evidence: SOIL focuses on soil health and regenerative agricultural practices, while Growing Futures explores the development of biological materials and alternative production processes. SDG 3 therefore remains a relevant conceptual background, but not an objective directly activated or demonstrated by the cases considered.
	Synergistic	Activated through transdisciplinary learning and capacity-building. The MUSAE Factory Model promotes non-formal learning processes based on collaboration among artists, technologists, and enterprises, supporting the development of hybrid skills that are difficult to acquire through traditional educational pathways. The residency programmes, training activities, and teaching materials associated with the DFA method configure an experimental learning environment oriented towards practice. In addition, the community component of the model, which connects artists, researchers, educators, and experts, contributes to the construction of a shared learning ecosystem with intrinsic and transferable educational potential.
	Marginal	Potential integration into participatory and inclusive processes. The MUSAE Factory Model does not explicitly address gender, either in selection criteria, team composition, or evaluation tools. Although it is not structurally exclusionary, the absence of active gender-mainstreaming measures represents a relevant gap in relation to SDG 5. In this sense, the model shows potential alignment with gender-equity objectives, but this dimension is not currently activated in a systematic manner. Future research could investigate the extent to which the artistic and collaborative practices integrated into the model facilitate or hinder equitable participation in innovation processes, helping to orient its evolution in a more inclusive direction.
	Indirect	Indirect relevance to agro-ecological systems and regenerative practices. The SOIL case integrates environmental sensors for monitoring soil parameters such as moisture, temperature, and ground conditions, which are indirectly connected to the sustainable management of water resources in agriculture. However, water is not addressed as an explicit objective, either in the cases analysed or in the methodological structure of the model. A possible extension of the framework to application domains specifically oriented towards water management could strengthen its alignment with SDG 6 more directly.
	Marginal	The energy-transition dimension, which is central to SDG 7, does not fall within the application domain of the cases analysed or within the current configuration of the MUSAE Factory Model. The model does not explicitly consider energy production, distribution, or accessibility as design dimensions. However, the adoption of the framework in application fields beyond the 'food as medicine' domain could open up more direct integrations with sustainable-energy issues, broadening its field of relevance.
	Indirect	Synergies with new creative and technological value chains, with potential tensions between growth and sustainability. The MUSAE Factory Model supports forms of collaboration among SMEs, artists, and technologists that may contribute to generating new employment opportunities and strengthening local innovation ecosystems. However, these effects in terms of work and sustainable economic growth depend on conditions that exceed the perimeter of the model, particularly the transition towards higher Technology Readiness Levels and the capacity to translate prototypes into stable forms of industrial adoption. In this sense, a possible tension emerges between the model's experimental and anticipatory dimension and its effective integration into logics of economic growth, highlighting the need for further development to ensure lasting employment impacts consistent with sustainability principles.
	Directly activated / enabling	The core of the model: an infrastructure for systemic and transdisciplinary innovation. SDG 9 constitutes the enabling objective of the MUSAE Factory Model, conceived as an open methodological infrastructure for industrial innovation that is futures-oriented and people-centred, in line with the principles of Industry 5.0. Through the involvement of SMEs, cross-sector collaboration, and the development of prototypes up to TRL5, the model contributes to building more resilient and inclusive innovation ecosystems capable of integrating technological, social, and ecological dimensions. The open-source nature of the framework further strengthens its potential for dissemination and adaptation. In this sense, SDG 9 operates as a transversal lever capable of activating systemic effects and generating indirect impacts on multiple other goals of the 2030 Agenda.

SDG	Relationship with MUSAE	Rationale
	Trade-off / risk	Inclusion of diverse actors and participatory approaches, with potential tensions related to equitable access. The MUSAE Factory Model promotes collaboration among heterogeneous actors, including SMEs, artists, and technologists, fostering participatory and transdisciplinary dynamics. However, its implementation depends on specific enabling conditions, such as the presence of EDIH infrastructures, access to European funding, and the availability of organisations open to experimentation. This dependence risks reproducing or amplifying inequalities between geographical and institutional contexts with different levels of innovation maturity. The adoption of the model in less technologically developed contexts therefore presents significant barriers, which may result in the concentration of benefits in already advantaged systems. In this sense, a structural tension emerges between the model's capacity to generate systemic innovation and its actual accessibility, configuring equity of access as a critical dimension to be addressed in future developments of the framework.
	Synergy	Potential applicability to sustainable urban and territorial contexts. The Growing Futures case explores bio-responsive materials and hybrid infrastructures between biological and technological systems, opening up possible applications in architecture and sustainability-oriented urban contexts. However, this connection with SDG 11 is not supported by direct evidence in the cases analysed, since the prototypes were neither developed nor tested in urban settings. SDG 11 therefore represents a future development direction for the framework, particularly for applying the model to the design of regenerative infrastructures and more resilient urban systems.
	Directly activated	Development of practices and prototypes oriented towards the sustainability of production systems. SDG 12 is directly activated in the cases analysed, which propose alternative paradigms of production and resource use. SOIL reinterprets agricultural infrastructure as a relational and experiential system, promoting regenerative practices based on soil care and the circularity of processes. Growing Futures, by contrast, experiments with mycelium-based biological materials as alternatives to conventional synthetic materials, contributing to the reduction of the environmental impact of production. At the methodological level, the DFA integrates criteria of sustainability, circularity, and impact assessment from the initial phases, orienting innovation trajectories towards more responsible models of production and consumption.
	Directly activated	Integration of the climate dimension into anticipatory and design processes. SDG 13 is directly activated in the cases analysed, which address climate change through strategies of mitigation and environmental-impact reduction. SOIL acts on soil degradation as one of the main climate challenges, promoting regenerative agricultural practices that contribute to carbon reduction and to strengthening ecosystem resilience. Growing Futures explores low-impact biological materials as alternatives to carbon-intensive production processes. At the methodological level, the DFA integrates systemic-analysis tools, such as STEEP+V and the mapping of non-human stakeholders, which make it possible to anticipate and make explicit potential trade-offs between technological development and climate integrity, orienting innovation trajectories towards more sustainable solutions.
	Marginal / indirect	Not directly addressed in the case studies analysed. Aquatic ecosystems do not fall within the application domain of the MUSAE Factory Model in its current configuration. Any indirect connections, for example through reduced soil pollution in the SOIL case or the substitution of plastic materials in Growing Futures, remain implicit and are not supported by empirical evidence. SDG 14 therefore represents a non-activated area, although it may become potentially relevant in future applications of the framework in domains related to the management of marine and coastal resources.
	Directly activated	Strongly supported by the cases analysed. SDG 15 is directly activated through systemic attention to terrestrial ecosystems, biodiversity, and regenerative processes. The SOIL case centres on soil health understood as a living infrastructure, addressing issues such as degradation, fertility, and regenerative agricultural practices. Growing Futures integrates biological processes, particularly mycelium growth, into technological systems, proposing a post-anthropocentric paradigm in which the natural and the artificial operate symbiotically and interdependently. Taken together, the two cases show how technological innovation can be oriented not towards the replacement of natural ecosystems, but towards their regeneration and valorisation, contributing to a redefinition of the relationship between production systems and ecological integrity.
	Marginal	Not explicitly addressed by the model. The MUSAE Factory Model introduces elements that can be associated with anticipatory governance and participatory decision-making processes through interdisciplinary co-creation practices, shared construction of future scenarios, and collective deliberation on the ethical and social implications of technological development. These dynamics may contribute indirectly to strengthening more transparent and inclusive organisational cultures, in line with some principles of SDG 16. However, the model does not explicitly address issues related to justice, peace, or institutional governance, which remain outside its application perimeter.
	Directly activated	Multi-actor collaboration lies at the centre of the MUSAE Factory Model. SDG 17 is directly activated, since the model is founded on cross-sector partnership as a generative principle: collaboration among artists, SMEs, technologists, researchers, and civil-society stakeholders constitutes the operational core of the framework. The open-source nature and community architecture of the model support its replicability and adaptability in different contexts, contributing to the strengthening of collaborative networks for innovation at European and international scales.

Tab. 3 | The MUSAE Factory Model and SDGs 1-17 (credit: the Authors, 2025).

12, 13, and 15, with SDG 9 acting as an enabling goal. The MUSAE Factory Model fosters synergies among industrial innovation, environmental sustainability, and the transformation of production systems, but it also makes certain trade-offs visible, generating tensions between technological innovation and resource consumption, conflicts between scalability and sustainability, and difficulties in balancing economic objectives with long-term impacts. Overall, these limits indicate the need for further developments of the model aimed at strengthening the connections among experimentation, validation, and implementation, as well as supporting its application in different domains and contexts, thereby contributing to a broader integration between anticipatory innovation and systemic transformation processes.

Conclusions | The contribution has analysed the MUSAE Factory Model as a proposal for systemic innovation capable of integrating artistic practices, technological development, and futures exploration. More than a model oriented towards producing market-ready solutions, it operates as a device for orienting innovation trajectories, intervening in the phases in which design choices remain open and reversible. From this perspective, the prototypes developed do not represent incomplete outcomes, but tools for making long-term visions operational, facilitating exchange among heterogeneous actors, and testing the systemic coherence of emerging solutions.

From a theoretical perspective, the research contributes to the debate on innovation for sustainability by proposing an integration of transformative approaches, anticipatory governance, and analysis of SDG interdependencies, which are still rarely translated into operational devices. The MUSAE Factory Model shows how these dimensions can be incorporated into a structured design framework, shifting the role of innovation from a factor of optimisation to a lever for constructing systemic synergies and anticipating trade-offs in the early phases of the process. In this sense, the contribution reinforces an emerging perspective in design and innovation studies that recognises the value of anticipatory and transdisciplinary approaches as necessary conditions for addressing systemic challenges.

Methodologically, the MUSAE Factory Model proposes a replicable infrastructure for transdisciplinary co-creation, moving beyond the episodic nature of art-technology collaborations and integrating scenario-building, design exploration, and prototypical development into a coherent process. Its main contribution lies in its capacity to connect imagination and operability, enabling forms of long-term-oriented innovation while remaining anchored to concrete application contexts. However, this integration remains, to date, largely confined to the early phases of the innovation process, highlighting the need for further developments to extend its effectiveness across the entire innovation life cycle.

At the same time, relevant limits and conditions of validity emerge. The model was developed in a specific context – EDIH infrastructures, European funding, and advanced collaborative ecosystems – which conditions its replicability. Moreover, the prototypes are positioned at intermediate levels of technological maturity (TRL4-5), and the transition towards higher levels requires a set of conditions – validation in real contexts, engineering, business models, and regulatory support – that exceed the perimeter of the framework. This discontinuity reveals a structural tension between the exploratory nature of the model and the logics of large-scale implementation, which represents one of the main unresolved issues. Within this framework, future research may develop along four main directions: 1) cross-sector extension of the model beyond the current domain, in order to verify the transferability of the framework in contexts with different levels of technological and regulatory maturity, as well as in geographical and institutional contexts other than the European one; 2) longitudinal studies to analyse the evolution of projects beyond TRL5 and to understand which trajectories prototypes follow after the residency phase, and under which conditions transitions towards higher maturity levels become practicable; 3) development of impact metrics capable of assessing not only design outcomes, but also the cognitive, organisational, and cultural effects of the model; and 4) integration with market-oriented approaches, in order to explore hybrid configurations between anticipatory innovation and industrial implementation.

Overall, the MUSAE Factory Model is configured as a relevant, but still evolving, contribution to the definition of innovation models capable of operating under conditions of complexity and systemic uncertainty. Its central proposition, namely that sustainable innovation requires not only technological efficiency, but also cultural imagination, ethical reflection, and futures orientation, is not a consolidated outcome, but an open programme of research and experimentation.

Acknowledgements

This contribution brings together reflections deriving from the research activities carried out by the authors within the project 'MUSAE – A Human-Centred Factory for a Future Technological Sustainable Development driven by Arts'. The project received funding from the European Union's Horizon Europe programme (grant agreement no. 101070412). The views expressed in this article do not necessarily reflect the position of the European Commission. The MUSAE project (2022-2025) involved nine partners: Politecnico di Milano (IT), University of Barcelona (ES), University College Dublin (IE), The University of Manchester (UK), School of Electrical Engineering - University of Belgrade (SRB), Ab.Acus (IT), MADE (IT), PAL Robotics (ES), and Gluon (BE). The authors of this article are affiliated with Politecnico di Milano, as project coordinator, lead for the development of the DFA method and the MUSAE Factory Model, and lead for the first art-technology residency. This article presents the research gap, the main results, and two projects: SOIL and Growing Futures. The authors wish to thank the whole working group that took part in the MUSAE residencies, particularly those involved in the case studies presented in this article (L. Artioli, the company Uptoearth, D. Amandolese, and the Basque Biodesign Center), for their valuable contribution to the development of the SOIL and Growing Futures projects.

Notes

1) For more information, see the webpage: research-and-innovation.ec.europa.eu/research-area/industrial-research-and-innovation/industry-50_en [Accessed 8 April 2026].

2) For more information, see the webpage: figma.com/proto/Aq1pAgjJL1aEdewDlcwgLt/DFA-platform—-FINAL-VERSION?node-id=4435-2296&t=2pBoQ24nGEP2oiOp-1 [Accessed 8 April 2026].

3) For more information, see the webpage: miro.com/templates/design-futures-artdriven-method/ [Accessed 8 April 2026].

4) For more information, see the webpage: musae.starts.eu/musae/2nd-open-call-scenarios-by-lisa-mandemaker/ [Accessed 8 April 2026].

5) For more information, see the webpage: musae.starts.eu/musae/2nd-open-call-scenarios-by-peter-andersen/ [Accessed 8 April 2026].

6) For more information, see the webpage: adi-design.org/2025_i00871 [Accessed 8 April 2026].

References

Ahern, D. (2025), "The New Anticipatory Governance Culture for Innovation – Regulatory Foresight, Regulatory Experimentation and Regulatory Learning", in *European Business Organization Law Review*, vol. 26, issue 1, pp. 241-283. [Online] Available at: doi.org/10.1007/s40804-025-00348-7 [Accessed 8 April 2026].

Barbero, S. and Ferrulli, E. (2023), "Transizione ecologica e digitale – Il Design Sistemico nei processi di innovazione aperta delle PMI | Ecological and digital transition – Systemic Design in SMEs open innovation processes", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 13, pp. 269-280. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/13232023 [Accessed 27 April 2026].

Bühring, J. H. and Liedtka, J. (2018), "Embracing systematic futures thinking at the intersection of Strategic Planning, Foresight and Design", *in Journal of Innovation Management*, vol. 6, issue 3, pp. 134-152. [Online] Available at: doi.org/10.24840/2183-0606_006-003_0006 [Accessed 8 April 2026].

Bogers, M., Chesbrough, H. and Moedas, C. (2018), "Open innovation – Research, practices, and policies", in *California Management Review*, vol. 60, issue 2, pp. 5-16. [Online] Available at: doi.org/10.1177/0008125617745086 [Accessed 12 April 2026].

Candy, S. and Dunagan, J. (2016), "Designing an experiential scenario – The People Who Vanished", in *Futures*, vol. 86, pp. 136-153. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.futures.2016.05.006 [Accessed 8 April 2026].

Canina, M. and Monestier, E. (2023), "Design Futures to support Sustainable Food practices", in De Sainz Molestina, D., Galluzzo, L., Rizzo, F. and Spallazzo, D. (eds.), *IASDR*

2023 – Life-Changing Design, 9-13 October, Milan, Italy, pp. 1-15. [Online] Available at: doi.org/10.21606/iasdr.2023.521 [Accessed 12 April 2026].

Castillo-Rutz, N. and Purg, P. (eds) (2021), *MAST Manual – Education for innovation through social values*, Akademija Umetnosti – School of Arts. [Online] Available at: mastmodule.eu/wp-content/uploads/2021/03/MAST_manual_www.pdf [Accessed 12 April 2026].

Ceschin, F. and Gaziulusoy, I. (2016), "Evolution of Design for Sustainability – From Product Design to Design for System Innovations and Transitions", in *Design Studies*, vol. 47, pp. 118-163. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.destud.2016.09.002 [Accessed 12 April 2026].

Design Council (2005), *The Double Diamond design process model*, Design Council, London. [Online] Available at: designcouncil.org.uk/our-resources/the-double-diamond/ [Accessed 12 April 2026].

Dolejsova, M., Ampatzidou, C., Houston, L., Light, A., Botero, A., Choi, J., Wilde, D., Altarriba Bertran, F. A., Davis, H., Gil, F. G. G. and Catlow, R. (2021), "Designing for transformative futures – Creative practice, social change and climate emergency", in Sas, S. and Maiden, N. (eds), *Proceedings of the 13th Conference on Creativity and Cognition – C&C'21, Venice, Italy, June 22-23, 2021*, Association for Computing Machinery, New York (NY), article 3, pp. 1-9. [Online] Available at: doi.org/10.1145/3450741.3465242 [Accessed 8 April 2026].

Dunne, A. and Raby, F. (2013), *Speculative Everything – Design, Fiction, and Social Dreaming*, The MIT Press, Cambridge (MA).

Efremenko, T., Bruno, C., Monestier, E. and Canina, M. (2025), "The Design Futures Art-driven (DFA) Method – Structuring Art-Tech Collaboration for Sustainable Future of Food System", in Ahram, T., Karwowski, W. and Kalra, J. (eds), *Human Factors in Design, Engineering, and Computing – AHFE (2025) International Conference*, vol 199, AHFE International, USA, pp. 93-104. [Online] Available at: doi.org/10.54941/ahfe1006821 [Accessed 8 April 2026].

Escobar, A. (2018), *Designs for the pluriverse – Radical interdependence, autonomy, and the making of worlds,* Duke Press University, United States.

EUNIC – EU National Institute for Culture (2019), *Art + Tech Report – Stakeholder investigation*. [Online] Available at: eunic.eu/media/site/4f725e1ad1-1753182943/art-tech-report-2019_eunic-silicon-valley.pdf [Accessed 24 March 2026].

European Commission (2021), *Industry 5.0 – Towards a sustainable, human-centric and resilient European industry*, Publications Office of the European Union, Luxembourg. [Online] Available at: data.europa.eu/doi/10.2777/308407 [Accessed 8 April 2026].

European Commission (2020), *A Farm to Fork strategy for a fair, healthy and environmentally-friendly food system*. [Online] Available at: food.ec.europa.eu/system/files/2020-05/f2f_action-plan_2020_strategy-info_en.pdf [Accessed 10 April 2026].

European Commission (2019), *Communication from the Commission to the European Parliament, the European Council, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions – The European Green Deal*, document 52019DC0640, COM/2019/640 final. [Online] Available at: eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52019DC0640 [Accessed 8 April 2026].

Guston, D. H. (2014), "Understanding 'anticipatory governance'", in *Social Studies of Science*, vol. 44, issue 2, pp. 218-242. [Online] Available at: doi.org/10.1177/0306312713508669 [Accessed 8 April 2026].

In4Art (2020), *Art-driven innovation – A new path to innovation-led sustainable growth*. [Online] Available at: in4art.eu/wp-content/uploads/2020/02/In4Art-ADI-Whitepaper.pdf [Accessed 10 April 2026].

Irwin, T. (2015), "Transition design – A proposal for a new area of design practice, study, and research", in *Design and Culture*, vol. 7, issue 2, pp. 229-246. [Online] Available at: doi.org/10.1080/17547075.2015.1051829 [Accessed 10 April 2026].

Klein, M., Gerlitz, L. and Spychalska-Wojtkiewicz, M. (2021), "Cultural and creative industries as a boost for innovation and sustainable development of companies in cross-innovation process", in *Procedia Computer Science*, vol. 192, pp. 4218-4226. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.procs.2021.09.198 [Accessed 8 April 2026].

Mazzucato, M. (2018), "Mission Oriented Innovation Policy – Challenges and Opportunities", in *Industrial and Corporate Change*, vol. 27, issue 5, pp. 803-815. [Online] Available at: doi.org/10.1093/icc/dty034 [Accessed 8 April 2026].

Miller, R. (ed.) (2018), *Transforming the Future – Anticipation in the 21st Century*, Routledge, London. [Online] Available at: doi.org/10.4324/9781351048002 [Accessed 8 April 2026].

Minski, K. (2020), *Collaboration in experimental art – Case studies in co-creation, transdisciplinarity, and art-science practice at Ars Electronica Futurelab*, Doctoral Thesis, University of Newcastle, Callaghan. [Online] Available at: doi.org/10.13140/RG.2.2.34658.66242 [Accessed 8 April 2026].

Monestier, E., Efremenko, T., Fiore, M. and Canina, M. (2024), "Beyond Boundaries – Art-Tech Collaboration Driving Future-Oriented Innovation", in Markopoulos, E., Goonetilleke, R. S. and Luximon, Y. (eds), *Creativity, Innovation and Entrepreneurship – Proceedings of the 15th International Conference on Applied Human Factors and Ergonomics and the Affiliated Conferences, Nice, France, July 24-27, 2024*, AHFE International, New York, AHFE International Book Series, vol. 125, pp. 134-143. [Online] Available at: doi.org/10.54941/ahfe1004729 [Accessed 8 April 2026].

Morin, E. (2020), "Per l'uomo è tempo di ritrovare sé stesso", interview by Scialoja, A., in *Avvenire.it*, 15/04/2020. [Online] Available at: avvenire.it/agora/pagine/per-luomo-tempo-di-ritrovare-se-stesso [Accessed 8 April 2026].

Nambisan, S., Wright, M. and Feldman, M. (2019), "The digital transformation of innovation and entrepreneurship – Progress, challenges and key themes", in *Research Policy*, vol. 48, issue 8, pp. 1-9. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.respol.2019.03.018 [Accessed 10 April 2026].

Nazarko, Ł. (2019), "Responsible research and innovation – A conceptual contribution to theory and practice of technology management", in *Business | Theory and Practice*, vol. 20, pp. 342-351. [Online] Available at: doi.org/10.3846/btp.2019.32 [Accessed 8 April 2026].

Nilsson, M., Griggs, D. and Visbeck, M. (2016), "Policy – Map the interactions between Sustainable Development Goals", in *Nature* vol. 534, pp. 320-322. [Online] Available at: doi.org/10.1038/534320a [Accessed 8 April 2026].

OECD – Organisation for Economic Co-operation and Development (2024), *7th OECD World Forum on Well-being – Summary of key messages*. [Online] Available at: oecd.org/content/dam/oecd/en/networks/oecd-well-being-world-forums/7wf/7wf-summary-key-messages.pdf [Accessed 27 April 2026].

OECD – Organisation for Economic Co-operation and Development (2018), *OECD Science, Technology and Innovation Outlook 2018 – Adapting to Technological and Societal Disruption*, OECD Publishing, Paris. [Online] Available at: doi.org/10.1787/sti_in_outlook-2018-en [Accessed 8 April 2026].

Pham-Truffert, M., Metz, F., Fischer, M., Rueff, H. and Messerli, P. (2020), "Interactions among Sustainable Development Goals – Knowledge for identifying multipliers and virtuous cycles", in *Sustainable Development*, vol. 28, issue 5, pp. 1236-1250. [Online] Available at: doi.org/10.1787/sti_in_outlook-2018-en [Accessed 8 April 2026].

Purg, P., Cacciatore, S. and Gerbec, J. C. (2023), "Establishing ecosystems for disruptive innovation by cross-fertilizing entrepreneurship and the arts", in *Creative Industries Journal*, vol. 16, issue 2, pp. 115-145. [Online] Available at: doi.org/10.1080/17510694.2021.1969804 [Accessed 8 April 2026].

Schnugg, C. and Song, B. (2020), "An organizational perspective on ArtScience collaboration – Opportunities and challenges of platforms to collaborate with artists", in *Journal of Open Innovation | Technology, Market, and Complexity*, vol. 6, issue 1, article 6, pp. 1-20. [Online] Available at: doi.org/10.3390/joitmc6010006 [Accessed 8 April 2026].

Schot, J. and Steinmueller, W. E. (2018), "Three frames for innovation policy – R&D, systems of innovation and transformative change", in *Research Policy*, vol. 47, issue 9, pp. 1554-1567. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.respol.2018.08.011 [Accessed 8 April 2026].

Stirling, A. (2015), *Emancipating transformations – From controlling 'the transition' to culturing plural radical progress*, STEPS Centre, University of Sussex, Brighton. [Online] Available at: steps-centre.org/wp-content/uploads/Transformations.pdf [Accessed 8 April 2026].

Tonkinwise, C. (2015), "Design for transitions – From and to what?", in *Design Philosophy Papers*, vol. 13, issue 1, pp. 85-92. [Online] Available at: doi.org/10.1080/14487136.2015.1085686 [Accessed 8 April 2026].

Tõnurist, P. and A. Hanson (2020), *Anticipatory innovation governance – Shaping the future through proactive policy making*, OECD Publishing, Paris. [Online] Available at: doi.org/10.1787/cce14d80-en [Accessed 8 April 2026].

UN – United Nations (2023), *The Sustainable Development Goals Report 2023 – Special Edition*, United Nations, New York. [Online] Available at: unstats.un.org/sdgs/report/2023/The-Sustainable-Development-Goals-Report-2023.pdf [Accessed 27 April 2026].

UN – United Nations (2015), *Transforming our World – The 2030 Agenda for Sustainable Development*. [Online] Available at: sdgs.un.org/2030agenda [Accessed 8 April 2026].

UNDRR – United Nations Office for Disaster Risk Reduction (2022), *Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction 2022 – Our world at risk – Transforming governance for a resilient future*. [Online] Available at: undrr.org/media/79595/download?startDownload=20260429 [Accessed 27 April 2026].

Valenti, A., Scalisi, F., Sposito, C., Dellamotta, L. and Masserdotti, A. (2024), "Energia, tecnologia emotiva e valore culturale dei dati – Creare consapevolezza nell'utente con lo storytelling | Energy, emotional technology and cultural value of data – Creating user awareness through storytelling", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 15, pp. 70-83. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/1552024 [Accessed 27 April 2026].

van Vliet, R. G. (2020), *S+T+ARTS – Collaboration toolkit*, STARTS Ecosystem. [Online] Available at: starts.eu/wp-content/uploads/starts-toolkit-13july2020.pdf [Accessed 10 April 2026].

van Vliet, L. G., Coto, M., Duarte, M., Soldati, M., Wieringck, N., van Vliet, R. G. and Birsel, Z. (2024), *Creativity meets industry – A practical guide to transformative partnerships*, Better Factory. [Online] Available at: starts.eu/wp-content/uploads/Better-factory-toolkit.pdf [Accessed 10 April 2026].

Voros, J. (2003), "A generic foresight process framework", in *Foresight*, vol. 5, issue 3, pp. 10-21. [Online] Available at: doi.org/10.1108/14636680310698379 [Accessed 10 April 2026].

Whitaker, A. (2016), *Art thinking – How to carve out creative space in a world of schedules, budgets and bosses*, HarperBusiness, New York.

Zannoni, M., Succini, L., Rosato, L. and Pasini, V. (2024), "Transitional industrial designer – La responsabilità di progettisti e imprese per una transizione sostenibile | Transitional industrial designer – The responsibility of designers and companies for a sustainable transition", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 15, pp. 332-343. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/15282024 [Accessed 27 April 2026].

AGATHÓN – International Journal of Architecture, Art and Design | n. 19 | 2026 | pp. 368-381
ISSN print: 2464-9309 – ISSN online: 2532-683X | doi.org/10.69143/2464-9309/19212026

Article Info

Received 12 March 2026
Revised 15 April 2026
Accepted 17 April 2026
Published 30 June 2026

INNOVAZIONE DIGITALE E CIRCOLARITÀ NEL SETTORE LEGNO-ARREDO
Strategie sostenibili per il Made in Italy

DIGITAL INNOVATION AND CIRCULARITY IN THE WOOD-FURNITURE SECTOR
Sustainable strategies for Made in Italy

Lucia Pietroni, Daniele Galloppo, Vittorio Giannetti,
Caterina Di Flamminio

Abstract

Il settore legno-arredo del Made in Italy, storicamente ancorato ai distretti industriali locali e alla manifattura artigiana, è attualmente coinvolto nella duplice transizione digitale ed ecologica. Ciò sta determinando un riassetto della sua identità culturale e produttiva al fine di trasformare l'attuale modello economico da lineare a circolare. Attraverso l'analisi di casi studio di aziende e prodotti il paper sottolinea come l'intersezione di questi due driver di innovazione, digitale ed ecologico, possa svolgere un importante ruolo nell'accelerare il cambiamento delle realtà produttive verso la circolarità e la sostenibilità, incrementando la loro capacità di generare valore e competitività.

The Made in Italy wood-furniture sector, historically rooted in local industrial districts and artisanal manufacturing, is currently undergoing a dual digital and ecological transition. This transformation is reshaping its cultural and productive identity, aiming to shift the current economic model from a linear to a circular one. Through the analysis of case studies involving companies and products, the paper highlights how the intersection of these two innovation drivers – digital and ecological – can play a significant role in accelerating the transition of production systems toward circularity and sustainability, while enhancing their capacity to generate value and competitiveness.

Keywords

transizione ecologica e digitale, economia circolare, digitalizzazione della filiera, settore legno-arredo, made in Italy

ecological and digital transition, circular economy, supply chain digitalisation, wood-furniture sector, made in Italy

Lucia Pietroni, Full Professor of Industrial Design at the SAAD, University of Camerino (Italy), and Director of the Master's programme in Eco-design & Eco-innovation, has been the President of EcodesignLab Srl, a spin-off of UniCam, since 2013. Her research focuses on sustainable and bio-inspired design, design for safety, and design-driven innovation processes. E-mail: lucia.pietroni@unicam.it

Daniele Galloppo, Researcher at the SAAD, University of Camerino (Italy), conducts research primarily in the field of design for environmental sustainability, with particular attention to the contribution of innovative materials and production processes to the evolution of industrial products, as well as Design for Safety. Since 2013, he has been a founding partner of EcodesignLab Srl. E-mail: daniele.galloppo@unicam.it

Vittorio Giannetti, Designer and PhD Candidate in Design for Made in Italy at the 'Luigi Vanvitelli' University of Campania (Italy), explores themes of environmental sustainability and the circular economy, with particular attention to product life-cycle assessment, digital innovation, and Design for Safety. E-mail: vittorio.giannetti@unicampania.it

Caterina Di Flamminio, Designer and PhD Candidate in Design for Made in Italy at the 'Luigi Vanvitelli' University of Campania (Italy), focuses her research on environmental sustainability and circular economy driven by digital innovation. E-mail: caterina.diflamminio@unicampania.it



La doppia transizione, digitale ed ecologica, nel settore del legno-arredo del Made in Italy non si limita a un semplice aggiornamento tecnico dei processi, ma riguarda un mutamento radicale che incide profondamente sui modelli produttivi, sulle culture aziendali e sulle forme di competitività maturate nel tempo. In questo scenario di cambiamento culturale del sistema manifatturiero del nostro Paese l'intersezione tra tecnologie digitali e pratiche di ecodesign può ridefinire prodotti e modelli aziendali nel mercato di riferimento (Fig. 1), agendo come leva strategica in grado di guidare la trasformazione industriale, anche attraverso processi di 'innovazione aperta', collaborando e condividendo conoscenze con attori esterni alle imprese (Kraus et alii, 2021; Robertsone and Lapina, 2023).

Rispetto al nuovo paradigma tecnologico-ambientale emergente la letteratura più recente evidenzia alcune discussioni ancora aperte: da un lato la doppia transizione è riconosciuta come un 'vettore prioritario' per orientare sistemi produttivi, filiere e prodotti verso configurazioni più circolari e sostenibili (Antikainen, Uusitalo and Kivikytö-Reponen, 2018; Barbero and Ferrulli, 2023), in particolare un approccio tecnicista attribuisce agli strumenti digitali la capacità di superare direttamente limiti e barriere (Pagoropoulos, Pigosso and McAloone, 2017), dall'altro lato una prospettiva critica evidenzia come essa possa accentuare il divario tra grandi imprese e piccole e medie imprese (PMI), generando per queste ultime un aggravio economico e organizzativo non sempre accompagnato da un'effettiva ottimizzazione dei processi.

Nel comparto legno-arredo del Made in Italy, fortemente radicato nei distretti industriali e sostenuto da un Patrimonio di 'saperi produttivi' (Becattini, 1998; Bettiol and Micelli, 2005) tale integrazione assume un ruolo strategico per rafforzare competitività, innovazione e identità territoriale e nazionale. Tuttavia se da un lato la transizione ecologica richiede alle PMI un cambiamento lungo e complesso per il superamento del 'paradigma lineare' (Fig. 2; EMF, 2013; Charter, 2018; Yang and Vezzoli, 2024), dall'altro la transizione digitale e i nuovi strumenti operativi rappresentano una concreta opportunità per semplificare questo passaggio verso la doppia transizione.

Rispetto alla criticità di trasferimento dei dati tra i diversi attori della filiera produttiva, dovuto principalmente a una catena eterogenea e frammentata, i sistemi IoT e la Blockchain possono rafforzare la trasparenza delle informazioni, mentre il gemello digitale e gli strumenti di Life Cycle Assessment consentono di misurare gli impatti ambientali dei prodotti e dei processi (Pagoropoulos, Pigosso and McAloone, 2017; Vezzoli, 2017; Antikainen, Uusitalo and Kivikytö-Reponen, 2018; Bajardelli and Bolognini Cobianchi, 2024).

Nonostante la disponibilità e l'offerta di questi sistemi 'intelligenti' l'allineamento tra obiettivi di circolarità e digitalizzazione nelle PMI non è immediato, ma è subordinato alla disponibilità di risorse finanziarie, alle capacità organizzative e al livello di fattibilità operativa (Ben Youssef, 2025; Hein, Münter and Zimmermann, 2026). A incentivare ulteriormente le imprese verso la costruzione di una filiera più sostenibile e circolare, anche attraverso l'implementazione di soluzioni di tracciabilità dei dati lungo l'intero ciclo vita dei prodotti, contribuiscono i requisiti ambientali esplicitati dal Regolamento europeo sull'Ecodesign per i Prodotti Sostenibili (ESPR; European Union, 2024). Questa normativa rappresenta un quadro di riferimento destinato a incidere progressivamente sulle modalità di progettazione, gestione e comunicazione delle informazioni sui prodotti, introducendo il Passaporto Digitale di Prodotto (DPP), un nuovo strumento operativo per le aziende che rafforza la centralità dei dati come 'infrastruttura abilitante' per una corretta gestione e informazione delle risorse lungo tutta la filiera e nel ciclo vita dei prodotti.

In questa prospettiva il contributo intende dimostrare che nel settore legno-arredo del Made in Italy, la doppia transizione genera effetti significativi solo quando l'innovazione digitale è fortemente integrata con le strategie di ecodesign e supportata dalla capacità organizzativa e dalla qualità delle relazioni tra le diverse imprese della filiera.

In relazione allo scenario individuato l'articolo affronta quindi la tematica attraverso due sezioni: la prima delinea lo stato dell'arte del settore in esame, definendo la cornice interpretativa, gli assetti distrettuali, l'analisi delle criticità ambientali del comparto e le principali coordinate della transizione digitale ed ecologica, con attenzione alle relative implicazioni e ai possibili limiti e barriere; la seconda presenta un'analisi critica di quattro casi studio di aziende italiane del legno-arredo, esempi rilevanti nell'adozione di strategie integrate per la doppia transizione, sia su un livello macro, riferito all'impresa e alla filiera, sia su un livello micro, relativo allo sviluppo di prodotti circolari.

L'obiettivo è restituire una sintesi delle evidenze ricorrenti relative a benefici ambientali ed economici, tecnologie digitali abilitanti e strategie di ecodesign adottate, che caratterizzano la transizione ecologica e digitale di questo specifico comparto. I risultati di questa sintesi saranno utili a descrivere il livello di transizione in corso del settore individuato, ma soprattutto a colmare una lacuna rilevante nello stato dell'arte: la carenza di studi che analizzano la doppia transizione all'interno di filiere distrettuali frammentate e composte prevalentemente da PMI, come quella del legno-arredo italiano.

Tale prospettiva consente di mettere in luce condizioni, barriere e potenzialità che difficilmente emergono negli studi più generici sulla digitalizzazione e sulla circolarità. Inoltre il focus sul Made in Italy consente di evidenziare come la doppia transizione si confronti con modelli produttivi identitari basati sul 'saper fare' e sul radicamento territoriale, offrendo quindi alla comunità scientifica internazionale un contributo originale per comprendere come innovazione digitale ed ecodesign si adattino a contesti manifatturieri ad alta intensità artigianale.

Il settore legno-arredo come identità del Made in Italy | Il Made in Italy è un 'segno di riconoscibilità e valore', veicolato nel mondo attraverso le 'eccellenze' e i prodotti industriali – diventati icone del design – realizzati dalle diverse maestranze e competenze presenti nel nostro Paese (Temperini, Gregori and Palanga, 2016). Al contempo rappresenta una realtà eterogenea in forte evoluzione, legata alle risorse del territorio, che continua a sviluppare il 'saper fare' con il 'saper commerciare, distribuire e comunicare' (Bassi, 2017). Tale identità costruita nel tempo è riassumibile nel concetto di 'bello e ben fatto', attraverso la qualità manifatturiera e la 'sapiente' sintesi tra progettazione, sensibilità materica e maestria esecutiva, tramandate e rinnovate nei decenni (Tosi, 2015; Bettiol 2015; Dellapiana, 2022).

Secondo Becattini (1998), l'unicità dei distretti industriali, sviluppatasi durante il 'miracolo economico' e consolidata negli anni Settanta e Ottanta dello scorso secolo, è riconducibile al processo di 'cross-fertilisation' (Ricciardi, 2013) tra diverse realtà aziendali – di cui la maggior parte è a conduzione familiare – fortemente legate al territorio e alle sue risorse materiali, artigianali e culturali: questo processo ha contribuito a plasmare l'identità del modello imprenditoriale del Made in Italy così come la conosciamo oggi. Inoltre, nonostante la delocalizzazione produttiva e la globalizzazione degli anni Novanta abbiano elevato la complessità delle filiere di approvvigionamento, i distretti del Made in Italy hanno saputo mantenere un ruolo propulsivo, anche per merito di sinergie tra designer, artigiani e imprenditori locali (Bassi, 2017; Cianfanelli et alii, 2018; Claudi de Saint Mihiel, 2024).

Oggi si contano circa 159 distretti industriali (Intesa Sanpaolo, 2025), che continuano a operare per il mantenimento e la valorizzazione dell'identità ereditata, in molti casi innovata nel tempo. Tra i settori cardine appartenenti alle 'quattro A' – Arredo, Abbigliamento, Agroalimentare e Automotive – il Sistema Casa è tra i più attivi (Fig. 3), valorizzando il proprio comparto attraverso il sapiente dialogo tra la cultura progettuale del 'saper fare', le capacità produttive e le peculiarità del territorio (Bettiol, 2015; MIMI, 2026). Il processo di costruzione dell'identità del settore del mobile ha consentito anche lo sviluppo di diversi Poli di eccellenza industriale: la Brianza e l'area trevigiana e di Pordenone, per la produzione di pannelli e componenti per arredi (Unioncamere and Centro Studi Guglielmo Tagliacarne, 2024); il nord delle Marche per la produzione di cucine; la Puglia come distretto dell'imbottito (Intesa Sanpaolo, 2025).

All'interno di questi distretti industriali il Design è stato determinante per i processi di sviluppo e innovazione, incrementando il valore del brand e l'identità del Made in Italy percepita nel mondo. Aziende come Cassina, B&B Italia, Poltrona Frau, Molteni&C, Poliform, Fantoni, Kartell e Magis hanno contribuito, tramite collaborazioni con importanti Maestri del Design e la realizzazione di prodotti di alta qualità, alla definizione del 'design italiano contemporaneo', apprezzato in tutto il mondo (Bassi, 2017). Inoltre eventi fieristici internazionali, in primis il Salone del Mobile di Milano, affermatosi come vetrina globale, hanno promosso e veicolato, attraverso l'esposizione di prodotti innovativi e 'ben fatti', l'identità del Made in Italy, dando ulteriore impulso a tutto il comparto.

Tuttavia negli ultimi anni abbiamo assistito a una ridefinizione delle filiere del settore arredo, sempre più lunghe e complesse, fenomeno evolutivo del comparto da imputare soprattutto all'instabilità del mercato di riferimento, al fenomeno degli accorpamenti e delle acquisizioni delle imprese da parte di holding estere e, infine, alla ricezione delle recenti normative sull'ecodesign da parte delle aziende. Di fronte a questo cambiamento epocale la sfida della doppia transizione nel settore arredo può rappresentare per le PMI un'opportunità per incrementare la propria sostenibilità, migliorare il livello di digitalizzazione e di competitività, sviluppando prodotti più sostenibili e circolari e ponendo le basi per nuovi modelli di business.

La circolarità e digitalizzazione nel settore legno-arredo | A livello europeo la filiera legno-ar-

redo produce un fatturato di circa 140 miliardi di euro, sebbene sia annoverata tra i settori che richiedono urgenti interventi per migliorare la sostenibilità ambientale. Lo studio del Joint Research Centre colloca il settore 'arredi' al secondo posto, dopo il 'tessile-calzature', per impatti ambientali, la maggior parte attribuibili allo scenario di fine vita dei prodotti: solo in Europa si dismettono circa 10 milioni di tonnellate annue di mobili, di cui l'80-90% viene conferito in discarica o in incenerimento, mentre appena il 10% viene riciclato (Faraca et alii, 2024).

Inoltre l'architettura complessa degli arredi – spesso multimaterici e poco predisposti allo smontaggio e alla manutenzione – limita fortemente la possibilità di valorizzare le componenti e i materiali (Faraca et alii, 2024; Yang and Vezzoli, 2024; Maffei et alii, 2024). Alle criticità del prodotto si aggiungono la questione dell'obsolescenza programmata e il fenomeno degli 'arredi a bassa durata', che alimentano la generazione di scarti sia nelle fasi produttive sia a fine vita (Furmston and Braithwaite, 2025).

Rispetto al problema ambientale le imprese europee dell'arredo, comprese quelle del Made in Italy, sono chiamate perciò ad affrontare la duplice transizione circolare e digitale e a superare le numerose barriere che frenano la loro trasformazione: segmentazione della filiera di approvvigionamento; investimenti contenuti nell'innovazione tecnologica; difficoltà di allocazione delle risorse per la conversione verso modelli produttivi sostenibili e circolari; volatilità dei costi e difficoltà di approvvigionamento di materie prime (Buono, Capece and Laudante, 2018). L'Italia si colloca tuttavia tra i migliori Paesi in Europa per le 'prestazioni complessive di circolarità' (Circular Economy Network, 2025).

Secondo l'indagine GreenItaly di Unioncamere e Fondazione Symbola (2023) il 70% delle imprese investe nell'efficientamento energetico, il 76% seleziona fornitori certificati e il 96% adotta materiali sostenibili. A questi dati si aggiungono le pratiche di riciclo 'ad anello chiuso', gli approvvigionamenti da fornitori a breve distanza, la formazione di 'responsabili della sostenibilità' e, infine, l'adozione, seppur ancora timida, delle strategie di ecoprogettazione (modularità, disassemblabilità, manutenibilità, riparabilità e aggiornabilità) per estendere la vita utile degli arredi, anche attraverso lo sviluppo di modelli Product as a Service (PaaS; Pietroni, Di Stefano and Galloppo, 2023; Mesa, 2023; Wu and Pi, 2023). Il crescente interesse delle aziende verso modelli aziendali circolari, che danno centralità alle attività di progettazione, rappresenta un importante traguardo nella cultura d'impresa, considerando che circa l'80% degli impatti ambientali proviene dalla fase progettuale (Tan et alii, 2024).

Alla transizione ecologica si sovrappone poi il processo di digitalizzazione del settore, che sta contribuendo alla valorizzazione dei prodotti d'arredo e all'efficientamento dei processi nelle PMI (Guangju et alii, 2025). L'implementazione delle nuove tecnologie digitali funge da facilitatore e catalizzatore operativo per la circolarità del settore, rendendo quantificabili e monitorabili diverse tipologie di dati da includere nel DPP: prestazioni del prodotto, tracciabilità di materiali e componenti, modalità di manutenzione, corretto smaltimento e trasparenza della filiera (Barbero and Ferrulli, 2023). Le soluzioni IoT, come QR code, tag RFID, sistemi blockchain, data-driven systems e Intelligenza Artificiale, possono difatti migliorare il controllo e la trasparenza della filiera di approvvigionamento, stimare la domanda e pianificare la produzione, riducendo scarti e invenduti, ottimizzare l'inventario e la logistica e valutare lo stato di salute dei prodotti per estenderne la vita utile (D'Itria, Pei and Bertola, 2024; Sardjono et alii, 2025).

All'interno dei dipartimenti R&D delle aziende, in particolare nella fase di progettazione, l'utilizzo di strumenti CAD / CAM e Digital Twin consente di ottimizzare il prodotto già nelle prime fasi di sviluppo, realizzando dei modelli predittivi sulle prestazioni funzionali e ambientali lungo il ciclo vita (Pehlken et alii, 2024). Infine, considerata la complessità architetturale e materica di un arredo, è auspicabile l'adozione di Key Enabling Technologies (KETs) – già in uso nei settori tessile ed edilizio – come strumento promettente per migliorare la gestione degli scarti e ottimizzare la tracciabilità e la fruibilità dei dati relativi agli impatti ambientali fin dalle fasi preliminari di progetto (Rigillo, Galluccio and Paragliola, 2023; Islam et alii, 2025).

Il fenomeno di ammodernamento ed efficientamento della filiera è oggetto anche della ricerca italiana, la quale – sostenuta dalla Fondazione MICS (Made in Italy Circolare e Sostenibile)[1] e dalla partecipazione a progetti europei – sta presidiando il settore arredo e la duplice sfida, sviluppando buone pratiche caratterizzate dal recupero degli scarti, dalla creazione di laboratori collaborativi territoriali e da proposte per filiere trasformative, più circolari e resilienti, tramite strumenti digitali e nuovi modelli gestionali.

Considerata l'importanza – rilevata dalla letteratura tecnico-scientifica – della transizione ecologica e digitale per il settore arredo del Made in Italy, è stata condotta un'analisi critica dei report di sostenibilità, delle schede prodotto e di altri documenti aziendali, per approfondire e identificare i miglioramenti associati alle pratiche di 'digitalizzazione' e di 'circolarità' dei propri modelli di business.

Attraverso la descrizione di quattro casi studio di imprese italiane del settore dell'arredo l'indagine si sviluppa su due livelli, 'macro' e 'micro': il primo considera l'impresa nella sua totalità, osservando l'adozione di tecnologie digitali e i relativi effetti sul sistema produttivo; il secondo si focalizza sui prodotti, esaminando le strategie di ecoprogettazione adottate e l'implementazione di soluzioni digitali. Le aziende sono state selezionate in base ad alcuni

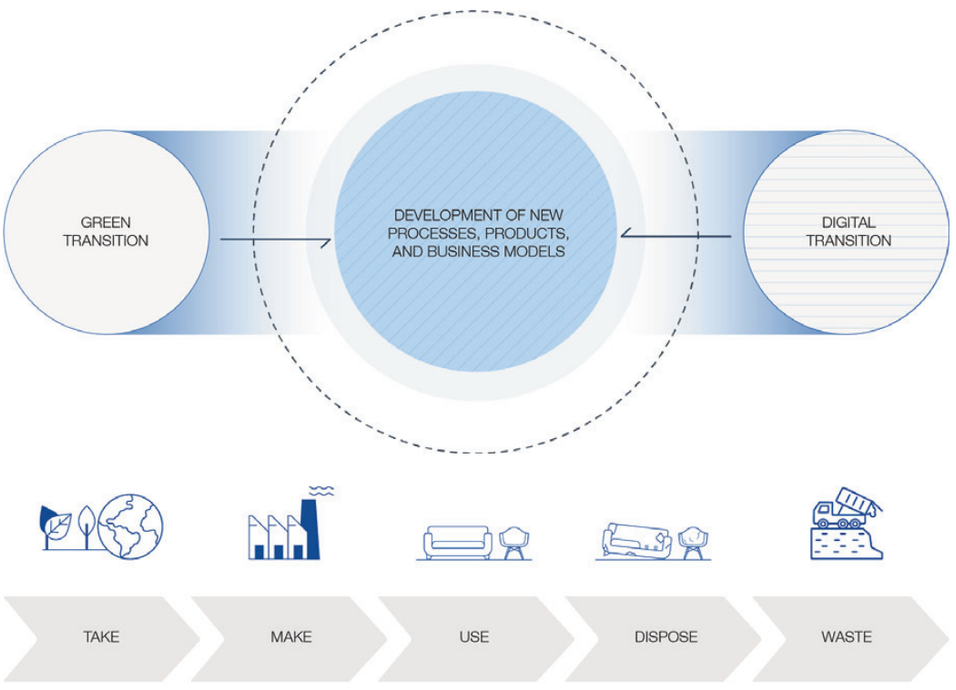


Fig. 1 | Graphical representation of the twin transition (ecological and digital): the convergence of the drivers of the circular economy and digital innovation gives rise to new production processes, products, and business models oriented towards sustainability (credit: The Authors, 2026).

Fig. 2 | Diagram of the current linear economic model in the wood-furniture sector, following a cradle-to-grave sequence of take, make, use, dispose, and waste (credit: The Authors, 2026).

requisiti: avere la 'filiera produttiva' esclusivamente in Italia; avere l'iscrizione a FederlegnoArredo o ad associazioni di categoria quali AssoArredo e AssoLegno; aver partecipato a progetti competitivi; aver ricevuto riconoscimenti e premi per la sostenibilità ambientale e conseguito certificazioni ambientali. L'obiettivo è rilevare le strategie progettuali e le tecnologie digitali che risultano essere particolarmente significative per accelerare la doppia transizione del settore arredo.

Natuzzi e Tonin Casa tra digitalizzazione dell'intera filiera e Passaporto Digitale di Prodotto | Il Gruppo Natuzzi è un interessante caso di integrazione di sistemi cyber-fisici e logiche di economia circolare in un settore ad alta intensità artigianale (Fig. 4). Fondata nel 1959 a Santeramo in Colle, nel distretto del mobile imbottito della Murgia, l'azienda ha sviluppato un modello basato su qualità dei materiali, controllo verticale della filiera, monitoraggio degli input produttivi e governance centralizzata dei processi di internazionalizzazione (Natuzzi S.p.A., 2023, 2025). A livello 'macro' la sostenibilità è abilitata dall'innovazione digitale in termini di qualità dell'ecosistema tecnologico, funzionale al governo dei flussi e alla riduzione degli sprechi. Nel 2024 Natuzzi ha introdotto l'infrastruttura RISE with SAP per la gestione aziendale e l'ottimizzazione della catena di approvvigionamento in ambiente cloud, ottimizzando la visibilità sui processi dell'intera filiera, riducendo asimmetrie informative tra progettazione e produzione e rafforzando la sicurezza dei dati e la conformità alle normative (SAP News Center Italy, 2024).

Parallelamente l'adozione del Digital Twin, sviluppato all'interno del progetto 2Next, in collaborazione con il Politecnico di Bari, ha favorito la simulazione dei processi produttivi e l'analisi virtuale delle prestazioni dei materiali, riducendo la realizzazione di prototipi fisici e le verifiche in laboratorio, accelerando il processo di immissione sul mercato delle nuove soluzioni. Tra i risultati concreti di questo sistema si possono citare: la riduzione degli scarti di produzione, attraverso algoritmi generati dall'IA, in particolare nelle fasi di taglio dei semilavorati (Fig. 5); un incremento dell'efficienza di sfruttamento delle risorse, grazie alla modellazione e alla simulazione stocastica delle linee produttive; l'ottimizzazione dell'assemblaggio del prodotto, grazie alla metodologia Lean Manufacturing 4.0 e all'introduzione di una linea di assemblaggio mobile automatizzata.

L'implementazione degli strumenti digitali e delle nuove tecnologie per l'automazione industriale fornisce, insieme all'approccio progettuale del tipo 'design for disassembly' adottato dalla Natuzzi, un importante contributo nel semplificare a fine vita le operazioni di disassemblaggio delle componenti e il corretto recupero di materiali. Il caso Natuzzi dimostra come la doppia transizione possa potenziare le capacità decisionali e operative nell'impresa, rafforzando il legame con il territorio e configurandosi non solo come produttore di arredamento, ma anche come un ecosistema tecnologico orientato alla sostenibilità, capace di trasformare limiti ambientali in vantaggi competitivi durevoli e misurabili (Natuzzi S.p.A., 2022, 2025). Tuttavia, nonostante i reali benefici apportati dagli strumenti tecnologici adottati da questa azienda, occorre anche evidenziare la loro scarsa trasferibilità e replicabilità nei contesti imprenditoriali più critici, spesso caratterizzati da limitate risorse finanziarie e scarse capacità gestionali, con il rischio di generare una 'transizione diseguale' all'interno dello stesso comparto.

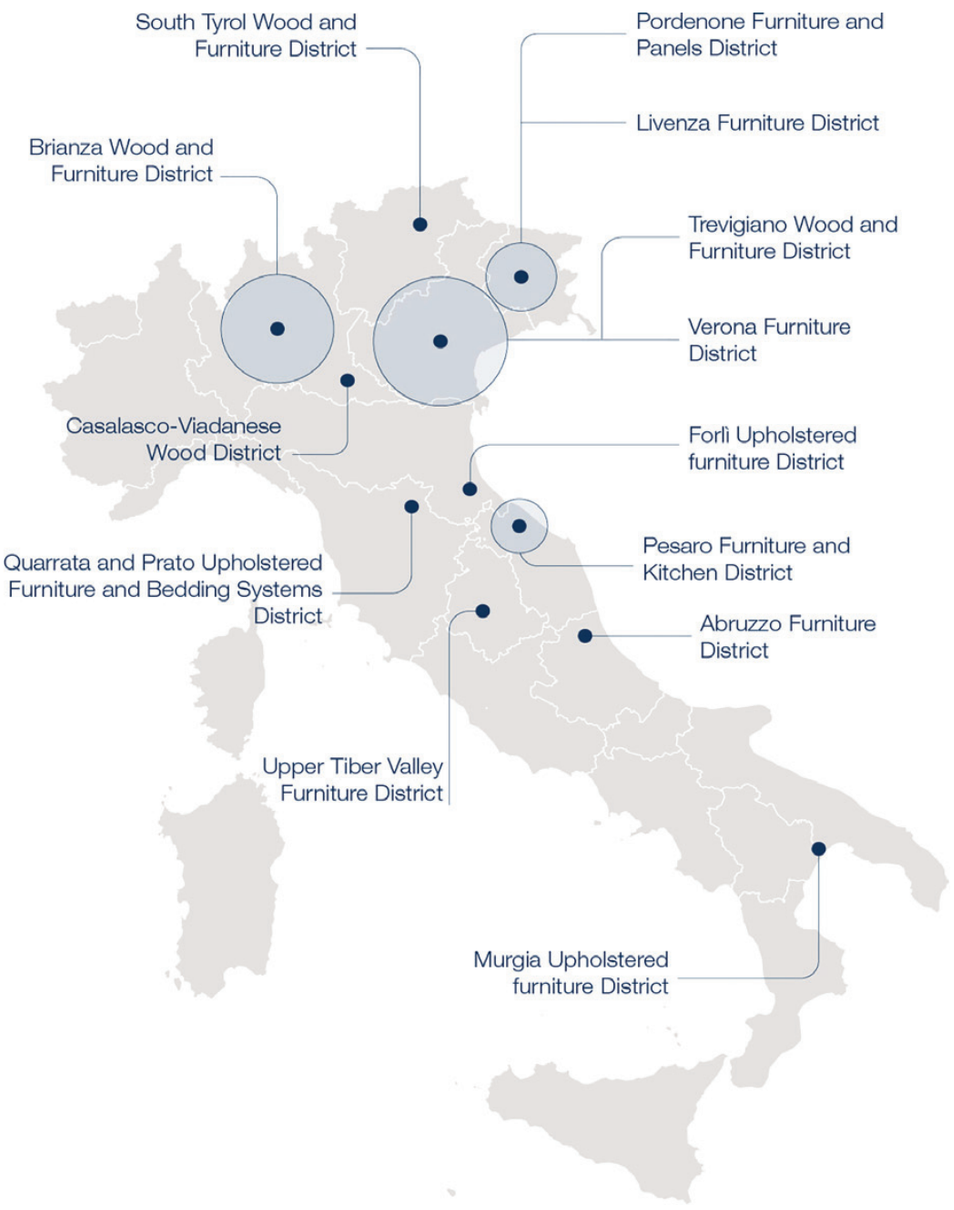


Fig. 3 | Infographic showing the main wood-furniture industrial districts across the Italian peninsula, highlighting the geographical distribution of the Made in Italy furniture sector (credit: The Authors, 2026).

Nel dibattito scientifico sulla sostenibilità delle filiere globali l'asimmetria informativa tra produttore e consumatore ostacola l'attuazione dell'economia circolare, rendendo pertanto prioritario il passaggio da una comunicazione di sostenibilità puramente 'dichiarativa' a una 'verificabile'.

Il caso Tonin Casa è un esempio emblematico di azienda italiana che ha deciso di adottare e integrare sistemi basati su blockchain e Intelligenza Artificiale, volti a veicolare in modo trasparente ed efficace le informazioni ambientali e il valore etico e materico dei propri prodotti. Dagli anni Settanta Tonin Casa produce arredi e complementi per zone giorno e notte con forte orientamento al design contemporaneo e alla lavorazione di legno, vetro e ceramica (Tonin Casa, 2025); radicata nel padovano e attiva sui mercati esteri, l'azienda ha gradualmente orientato la propria strategia verso la tracciabilità e la trasparenza informativa lungo la catena di approvvigionamento, introducendo soluzioni digitali. Attraverso la collaborazione con EZ Lab, start-up italiana specializzata nella tecnologia blockchain e nell'uso di tecnologie IA per la gestione dei flussi, l'azienda ha avviato lo sviluppo del DPP da applicare ai complementi d'arredo, pur non essendoci ancora uno standard per tale strumento (EZ Lab, 2025). Attraverso soluzioni di QR code e sistemi Made in Block è stato possibile sviluppare il DPP, includendo e rendendo fruibili agli utenti finali le informazioni sull'origine e sulla certificazione dei materiali, sulla composizione dei componenti, sulle modalità di produzione artigianale e sulla conformità ai requisiti ambientali e di sicurezza dei prodotti.

L'integrazione di tali tecnologie non si limita a una mera funzione di archiviazione, ma consiste nella creazione di un'infrastruttura in cui i dati di filiera, dall'approvvigionamento del legname alla finitura del prodotto, vengono acquisiti in un registro basato sulla Distributed Ledger Technology (DLT),



Fig. 4 | Historical photograph of Pasquale Natuzzi in his first workshop in Puglia, where the earliest sofas were crafted entirely by hand (credit: Natuzzi Group, 2026).

validati e concatenati in blocchi crittografati. Questa architettura garantisce l'immutabilità dei dati eliminando il rischio di manipolazioni o di greenwashing delle prestazioni ambientali, trasformando la tracciabilità in un sistema scientificamente verificabile e assicurando la conformità ai requisiti previsti dal DPP e dalla normativa europea ESPR.

Il sistema 'intelligente' per la tracciabilità dei dati e la documentazione delle caratteristiche dei prodotti lungo l'intero ciclo di vita è stato applicato agli arredi realizzati dall'azienda: tra i primi prodotti a sperimentare l'applicazione del DPP si distingue il progetto 'Lisa' (Figg. 6-8), una seduta disegnata da Ernesto Barbieri. Il caso studio dell'azienda Tonin Casa dimostra che la digitalizzazione della filiera, se integrata con i criteri di ecodesign, può generare evidenze verificabili utili all'azienda, ai consumatori, al miglioramento dei processi produttivi e al rispetto degli standard internazionali, contribuendo alla definizione di una filiera Made in Italy più responsabile, trasparente e sostenibile.

Al contempo l'implementazione del DPP, pur rappresentando un significativo segnale di allineamento dell'azienda alle direttive dell'ESPR, evidenzia alcune criticità rilevanti: in assenza di uno standard europeo condiviso, specificamente applicato al settore dell'arredo, la scalabilità e l'interoperabilità del sistema risultano limitate, con il rischio di confinare l'iniziativa a una gestione informativa prevalentemente circoscritta alla singola realtà aziendale di Tonin Casa. Inoltre, se da un lato l'impiego della blockchain e la validazione dei dati tramite registri crittografati contribuiscono a ridurre il rischio di greenwashing, dall'altro l'effettiva utilità del sistema nelle fasi di fine vita del prodotto resta parziale, in assenza di un'integrazione con le piattaforme operative dei gestori dei rifiuti e dei riciclatori.

Arper e Sitland, tra innovazione materica e metriche quantitative di circolarità e sostenibilità | Arper rappresenta un modello aziendale rigenerativo, fondato sulla circolarità dei materiali e sull'integrazione tra design e innovazione biomaterica. Fondata negli anni Settanta nel distretto produttivo veneto, nota per la produzione di sedute, tavoli e complementi di arredo di alta qualità, l'azienda ha integrato progressivamente strumenti digitali per il monitoraggio della filiera di approvvigionamento, sfruttando la trasparenza dei dati ambientali come leva strategica per la comunicazione e la competitività sul mercato.

Tra i prodotti di Arper, la Catifa Carta rappresenta l'apice della ricerca materica dell'azienda: reinterpretazione di Catifa 53 e progettata nel 2001 dallo studio Lievore Altherr Molina, Catifa Carta presenta una scocca realizzata in PaperShell, un materiale composito ottenuto da fogli di carta kraft legati con una resina naturale, derivata da scarti della lavorazione del legno (Figg. 9, 10). L'unicità del prodotto risiede nella capacità del materiale di stoccare l'anidride carbonica, poiché la CO_2 assorbita dalle piante durante la fotosintesi rimane incorporata nelle fibre di cellulosa; a fine vita il materiale può essere sottoposto a un processo di pirolisi che lo trasforma in 'biochar' (Fig. 11), un carbone vegetale utilizzabile come correttivo del suolo, con benefici per la circolarità e la biodiversità[2]. Nonostante l'eccellenza materica è opportuno considerare che l'efficienza circolare del 'biochar' è condizionata dalla presenza di impianti di pirolisi adeguati e dalla corretta sistemazione del rifiuto a fine vita. È necessario perciò che la filiera del recupero del legno sia adeguata nella gestione di materiali compositi innovativi; diversamente vi è il rischio di trattare il materiale secondo i tradizionali flussi di smaltimento, limitando o, addirittura, peggiorando il fine vita del prodotto.

I benefici apportati dal materiale sono stati ulteriormente incrementati dal contributo del design della sedia: la geometria 'a guscio' della scocca è studiata per offrire un supporto ergonomico senza nervature o rinforzi, riducendo il numero di componenti e l'uso di materiale. Inoltre il semplice sistema di giunzione 'vite-distanziale' (Fig. 12) tra base e scocca è concepito per favorire il disassemblaggio di tutto il prodotto.

Arper si è dotata di certificazioni che attestano la conformità ai più elevati standard internazionali. Rilevante è l'ottenimento dell'Environmental Product Declaration (EPD) per Catifa Carta, che colloca l'azienda come prima realtà in Italia e seconda in Europa a certificare e monitorare la filiera secondo lo standard ISO 14025. Tale dichiarazione si basa su un'analisi rigorosa degli impatti lungo l'intero ciclo di vita mediante Life Cycle Assessment (LCA). La sedia è inoltre certificata FSC per la tracciabilità delle materie prime legnose ed è qualificata GreenGuard Gold per la conformità ai limiti emissivi di VOC e a garanzia della salubrità dell'aria negli ambienti interni (Arper, 2025).

Tali certificazioni non solo confermano l'aderenza del prodotto a rigorosi standard di sostenibilità, ma costituiscono anche strumenti di misurazione oggettiva delle performance ambientali, in linea con le più recenti normative europee sul Product Environmental Footprint (PEF; European Commission, 2021) e sulle dichiarazioni ambientali di prodotto. In sintesi Catifa Carta è il risultato di un approccio sistemico alla sostenibilità che integra design per la circolarità del prodotto, innovazione dei materiali, adozione di strumenti digitali per il monitoraggio della supply chain e certificazioni ambientali internazionali.

Il secondo caso preso in esame è l'azienda Sitland che, fondata nel 1977 a Nanto nel distretto veneto, rappresenta un'eccellenza nell'integrazione di metriche quantitative applicate all'arredo per ufficio e spazi collettivi. Nel 2022 l'azienda ha deciso di allinearsi ai criteri del regolamento europeo ESPR attraverso il progetto 'ECONA – Our sustainable approach to design', un modello di sostenibilità integrato fondato sui principi di eco-design e orientato alla riduzione degli sprechi, all'abbattimento delle emissioni e alla circolarità dei prodotti[3]. Il sistema di arredo modulare Drop (Figg. 13, 14), progettato dal designer Zakaria Khalfaoui, è uno dei 'prodotti modello' che applicano i principi di circolarità adottati dall'azienda. Concepito come un ecosistema 'aperto', basato su tre elementi fondamentali – se-

duta, schienale e bracciolo – evoca la logica del 'drag&drop', consentendo una componibilità libera e intuitiva per configurare aree d'attesa e zone di lavoro informali. L'elemento distintivo risiede nella completa disassemblabilità delle componenti, poiché esclude l'uso di colle permanenti e altri sistemi di connessione irreversibili[4]. Questa scelta progettuale facilita la manutenzione e garantisce, a fine vita, che ogni materiale possa essere destinato al corretto recupero e al processo di valorizzazione.

Il progetto ECONA prevede inoltre l'utilizzo di un grafico di mappatura dei materiali, uno strumento di classificazione e di comunicazione delle informazioni e dei dati sulla composizione materica del prodotto, rivolto ai consumatori, che illustra la percentuale e la natura dei materiali impiegati. Queste informazioni consentono di comprendere efficacemente i materiali che costituiscono le componenti del prodotto, come metallo, tessuti e schiume, e di identificare con chiarezza quali frazioni possano essere riciclate o recuperate.

A supporto della transizione ecologica, Sitland ha introdotto specifici indicatori di circolarità per fornire parametri quantitativi della performance ambientale, analizzando il valore rigenerativo dei propri prodotti, inclusi quelli del sistema Drop. Tali indicatori valutano la quota di materiali riciclati immessi nel ciclo produttivo, la facilità di disassemblaggio e la durabilità, come parametri fondamentali per misurare la manutenibilità e la resistenza nel tempo, garantendo un ciclo di vita sensibilmente più lungo rispetto agli standard di settore.

L'integrazione di queste metriche nel sistema Drop consente di monitorare in modo trasparente e verificabile la sostenibilità della filiera, generando dati oggettivi per clienti, progettisti e committenti. Drop non è solo una seduta modulare e circolare, ma è un esempio concreto di applicazione delle modalità di comunicazione dei dati ambientali definite dalla normativa ESPR e dal DPP.

La combinazione tra scelte progettuali di ecodesign, l'impiego di una mappatura materica e lo sviluppo di una comunicazione quantitativa degli indicatori di circolarità rappresenta un modello virtuoso per favorire la duplice transizione e risulta potenzialmente replicabile anche da altre imprese del Made in Italy. Tuttavia alcune condizioni costituiscono barriere concrete alla sua diffusione: la prossimità distrettuale, la disponibilità di un team di ricerca e sviluppo interno e una cultura manifatturiera orientata al controllo diretto della produzione sono infatti fattori difficilmente replicabili in contesti produttivi frammentati o delocalizzati.

Attraverso l'analisi dei quattro casi studio è stato possibile sviluppare un diagramma di 'Sankey' (Fig. 15) che illustra le relazioni tra le pratiche di ecodesign adottate e gli strumenti digitali, insieme ai benefici generati dalla loro implementazione: a sinistra è illustrato l'insieme delle pratiche di transizione circolare e digitale adottate dalle aziende, come i sistemi basati sui dati, l'intelligenza artificiale, il passaporto di prodotto digitale e le strategie di design-for-X; a destra i principali benefici ottenuti attraverso queste strategie, tra cui il monitoraggio della catena di approvvigionamento, la riduzione degli scarti di produzione, il miglioramento dell'efficienza produttiva, la riduzione delle emissioni di anidride carbonica, una maggiore trasparenza del ciclo di vita e un migliore recupero e valorizzazione a fine vita. I flussi di collegamento evidenziano le associazioni tra le pratiche e gli strumenti delle quattro aziende considerate e i relativi benefici, mentre la loro ampiezza enfatizza visivamente le relazioni più rilevanti e ricorrenti.

I casi studio e gli Obiettivi dello Sviluppo Sostenibile dell'Agenda 2030 | Il processo di doppia transizione nel settore legno-arredo del Made in Italy si riflette nell'Obiettivo di Sviluppo Sostenibile (SDG) 9 dell'Agenda 2030 (UN, 2015), in quanto la digitalizzazione dei processi e dei dati rappresenta una leva strategica per l'innovazione industriale, l'efficienza produttiva e il rafforzamento della competitività delle filiere.

L'analisi dei casi studio, condotta con una doppia lente dal 'macro' al 'micro' (dalla filiera al prodotto), offre un riscontro più specifico del settore arredo nazionale rispetto ai target 9.4 e 9.5. Rispetto al primo target i casi studio descritti dimostrano che l'integrazione tra le strategie di ecodesign – riduzione, disassemblaggio e durabilità – e l'integrazione dei nuovi strumenti digitali supporta in modo favorevole l'aggiornamento dei processi produttivi, generando benefici sull'utilizzo delle risorse, sulla loro ottimizzazione e, più in generale, sulle performance ambientali dei prodotti d'arredo. Oltretutto la tracciabilità e la misurazione della circolarità, lungo tutto l'intero ciclo di vita, rendono governabili e trasparenti anche all'utente finale i criteri e le modalità di manutenzione e aggiornabilità per estendere la vita utile del prodotto. Ciò ha consentito alle aziende analizzate di adottare un approccio 'dalla culla alla culla', incentivando lo sviluppo sostenibile del brand e, dalla prospettiva della circolarità e della digitalizzazione, stimolando l'innovazione dei prodotti.

Contestualmente la coerenza con il target 9.5 è riconducibile all'incremento della ricerca applicata che le aziende hanno condotto sui citati casi studio – anche attraverso la collaborazione con Enti di ricerca, Università, Poli di innovazione e distretti tecnologici – al fine di sviluppare strategie e strumenti operativi in grado di supportare il management nel superare barriere e limiti relativi, soprattutto, 'all'organizzazione' e alla 'definizione delle risorse per gli investimenti', necessari per abilitare la duplice transizione.

Tuttavia l'evidenza empirica dei casi studio suggerisce anche l'esistenza di interdipendenze con ulteriori SDG. In termini di sinergie, la doppia transizione contribuisce in modo significativo all'SDG 12, attraverso la maggiore tracciabilità dei materiali, la misurazione delle performance ambientali e la diffusione di strumenti di progettazione circolare orientati a modelli di produzione e consumo più responsabili. L'SDG 8 risulta rafforzato nei processi di qualificazione del lavoro e di upgrading tecnologico delle imprese, sebbene tale effetto dipenda fortemente dalle capacità organizzative e dalle competenze digitali disponibili. L'SDG 13 beneficia infine dell'integrazione tra strumenti digitali e pra-



Fig. 5 | Digital optimisation of nesting during the cutting phase of upholstery semi-finished components, aimed at improving material efficiency and reducing production waste in sofa manufacturing (credit: Natuzzi Group, 2026).



Figg. 6-8 | Lisa chair, designed by Ernesto Barbieri for Tonin Casa, showing the construction, stitching, and material finishing of one of the products for which the company has implemented a QR code linked to the Digital Product Passport (credit: Tonin Casa, 2025).

tiche di ecodesign, che consentono una quantificazione e una riduzione più accurate degli impatti ambientali lungo il ciclo di vita del prodotto.

Accanto a queste sinergie emergono anche alcuni compromessi strutturali: l'introduzione di tecnologie digitali avanzate (Blockchain, Digital Product Passport e Digital Twin) può infatti accentuare le disuguaglianze tra imprese strutturate e PMI, con possibili criticità rispetto all'SDG 10 in termini di accesso equo alle tecnologie. Inoltre i costi di implementazione e la complessità gestionale dei sistemi digitali possono generare profondi squilibri tra sostenibilità ambientale e sostenibilità economico-organizzativa, limitando la scalabilità delle soluzioni.

Sul piano dell'affidabilità e della trasparenza dei dati la digitalizzazione è in grado di ridurre le asimmetrie informative, ma al contempo potrebbe spostare il rischio di greenwashing verso la qualità, l'interpretabilità e la comparabilità delle informazioni. Nel complesso la doppia transizione nel Made in Italy si configura come una leva trasversale di accelerazione per gli SDG 9, 12, 8 e 13, ma anche come generatrice di nuove asimmetrie sistemiche che attraversano l'intero programma dell'Agenda 2030, evidenziando la necessità di una governance multilivello capace di bilanciare innovazione, inclusività e accessibilità tecnologica.

Conclusioni | L'analisi condotta mostra che la doppia transizione nel settore legno-arredo del Made in Italy è un processo in evoluzione, caratterizzato da traiettorie non omogenee, accomunate da una progressiva integrazione tra strategie di ecodesign e strumenti digitali.

L'evidenza empirica dei casi studio suggerisce che i risultati più significativi emergono quando tecnologie digitali avanzate e pratiche di ecodesign vengono integrate in modo sistemico, trasformandosi in un'infrastruttura decisionale capace di rendere misurabile, verificabile e progettualmente praticabile la sostenibilità dei prodotti e della filiera. L'adozione di tecnologie quali i gemelli digitali, i sistemi basati sui dati e sull'intelligenza artificiale, le catene di valore e altre soluzioni digitali per la tracciabilità, opportunamente implementate nelle quattro aziende analizzate, non si limita a essere un mero strumento di efficientamento, ma ridefinisce il governo della filiera, la qualità informativa del prodotto e il supporto alle decisioni orientate alla sostenibilità.

Parallelamente le pratiche di eco-progettazione – dal Design per la Modularità al Design per il Disassemblaggio, dal Design per la Riparabilità al Design per la Durabilità, ecc. – contribuiscono a estendere la vita utile dei prodotti, a ridurre significativamente l'impronta di carbonio e a valorizzare il fine vita dei materiali e delle componenti degli arredi, incrementandone la circolarità. Criticamente il paper evidenzia, oltre alle opportunità, anche le vulnerabilità di un comparto composto prevalentemente da PMI, fortemente radicato nel territorio e sostenuto da una cultura del 'saper fare' che, pur costituendo un valore identitario, può rallentare l'adozione di pratiche di ecodesign e di innovazioni digitali e tecnologiche. Il cosiddetto 'paradosso della tradizione' mostra come la ricchezza del Patrimonio manifatturiero italiano possa, in alcuni casi, rallentare i processi di trasformazione organizzativa e tecnologica, soprattutto se confrontati con modelli più dinamici adottati da altri Paesi europei.

L'analisi proposta rappresenta un contributo rilevante alla letteratura scientifica sulla doppia transizione, solitamente focalizzata su contesti altamente industrializzati. Tuttavia lo studio non consente di generalizzare i risultati all'intero settore manifatturiero del legno-arredo. Le imprese analizzate dispongono infatti di competenze tecniche, risorse economiche e capacità organizzative che non sono sempre presenti nelle realtà più fragili del comparto. Inoltre la mancanza di dati quantitativi riferiti alle prestazioni ambientali – quali studi LCA, analisi di Carbon Footprint e indicatori di circolarità – non permette di valutare nel tempo l'evoluzione delle performance ambientali, né di sviluppare un confronto sistematico con altre filiere europee. La stessa efficacia degli strumenti digitali nelle fasi di fine vita risulta limitata dall'assenza di standard condivisi, in particolare di un DPP specifico per il settore legno-arredo e dalla mancanza di piattaforme interoperabili lungo la catena del valore.

La trasferibilità dei risultati appare possibile solo in presenza di condizioni favorevoli: un tessuto distrettuale coeso, dotato di prossimità operativa e culturale; competenze interne in design e ricerca e sviluppo; infrastrutture digitali condivise e standard uniformi per la gestione dei dati; capacità finanziarie in grado di sostenere investimenti di medio-lungo periodo. In assenza di tali condizioni la doppia transizione rischia di accentuare squilibri esistenti, generando una transizione 'diseguale' e di difficile scalabilità a livello settoriale.

Questi limiti aprono una serie di questioni rilevanti per la ricerca futura, delineando i possibili sviluppi e le tematiche ancora da indagare: a) approfondire come la digitalizzazione influenzi realmente la circolarità dei prodotti, sviluppando metriche comparabili, protocolli condivisi e dataset estesi che rendano valutabili gli esiti delle trasformazioni organizzative e progettuali; b) indagare la natura dei compromessi generati dall'introduzione di tecnologie complesse, considerando i costi di gestione, l'energia richiesta dai sistemi digitali e il rischio di forme emergenti del 'greenwashing digitale', soprattutto in assenza di verifiche terze e procedure certificate; c) monitorare il processo di definizione di standard europei dedicati al Passaporto Digitale di Prodotto per il settore dell'arredo, oggi ancora frammentati e non pienamente interoperabili; d) esplorare modelli di governance multilivello capaci di rendere accessibili gli strumenti digitali alle PMI, evitando che l'innovazione resti confinata a casi isolati.

In conclusione la doppia transizione si configura come un'opportunità per ripensare il posizionamento competitivo del Made in Italy non come un processo di omologazione, ma come una possibile evoluzione della sua identità manifatturiera. La sfida sarà trasformare l'equilibrio tra tradizione e innovazione in un vantaggio distintivo, sostenuto da dati affidabili, standard condivisi e da un ecosistema di supporto capace di rendere questa transizione inclusiva, scalabile e culturalmente coerente con la specificità del settore legno-arredo. In tale prospettiva gli sviluppi futuri non possono limitarsi all'introduzione di nuove tecnologie, ma dovranno coinvolgere trasformazioni sistemiche che comprendano competenze, culture produttive, strumenti di valutazione e modelli collaborativi capaci di accompagnare il comparto verso un nuovo paradigma competitivo e sostenibile.

The dual transition – digital and ecological – in the Made in Italy wood-furniture sector is not limited to a simple technical upgrade of processes. Rather, it represents a radical transformation that deeply affects production models, corporate cultures, and

forms of competitiveness developed over time. Within this context of cultural change in the national manufacturing system, the intersection of digital technologies and ecodesign practices can redefine both products and business models within their respective markets (Fig. 1), serving as a strategic lever to guide industrial transformation. This also occurs through open innovation processes, involving collaboration and knowledge sharing with actors external to companies (Kraus et alii, 2021; Robertsone and Lapina, 2023). With respect to the emerging techno-environmental paradigm, recent literature highlights several ongoing debates: on the one hand, the dual transition is recognised as a priority driver for orienting production systems, supply chains, and products toward more circular and sustainable configurations (Antikainen, Uusitalo and Kivikytö-Reponen, 2018; Barbero and Ferrulli, 2023). In particular, a technocentric approach attributes to digital tools the capacity to overcome existing limits and barriers directly (Pagoropoulos, Pigosso and McAloone, 2017). On the other hand, a more critical perspective suggests that this transition may widen the gap between large companies and small and medium-sized enterprises (SMEs), imposing additional economic and organisational burdens on the latter, often without corresponding process optimisation.

In the Made in Italy wood-furniture sector, which is strongly rooted in industrial districts and supported by a heritage of production knowledge (Becattini, 1998; Bettiol and Micelli, 2005), this integration plays a strategic role in strengthening competitiveness, innovation, and both territorial and national identity. However, whereas the ecological transition requires SMEs to undertake a long and complex process to move beyond the traditional linear paradigm (Fig. 2; EMF, 2013; Charter, 2018; Yang and Vezzoli, 2024), digital transition and new operational tools offer concrete opportunities to facilitate this shift toward the dual transition.

Regarding the critical issue of data transfer among different actors in the production chain – mainly due to its heterogeneous and fragmented structure – IoT systems and blockchain technologies can enhance information transparency, while digital twins and Life Cycle Assessment tools enable the measurement of environmental impacts of products and processes (Pagoropoulos, Pigosso and McAloone, 2017; Vezzoli, 2017; Antikainen, Uusitalo and Kivikytö-Reponen, 2018; Bajardelli and Bolognini Cobianchi, 2024).

Despite the availability of these intelligent systems, alignment between circularity and digitalisation goals within SMEs is not automatic and depends on financial resources, organisational capabilities, and operational feasibility (Ben Youssef, 2025; Hein, Münter and Zimmermann, 2026). Further incentives for companies to build more sustainable and circular supply chains – also through the implementation of data traceability solutions across the entire product life cycle – are provided by environmental requirements introduced by the European Ecodesign for Sustainable Products Regulation (ESPR; European Union, 2024). This regulation establishes a reference framework that will progressively influence how products are designed, managed, and communicated, introducing the Digital Product Passport (DPP). This new operational tool reinforces the central role of data as an enabling infrastructure for proper resource management and information sharing across the entire supply chain and product life cycle.

From this perspective, the paper aims to demonstrate that in the Made in Italy wood-furniture sector, the dual transition produces significant effects only when digital innovation is strongly integrated with ecodesign strategies and supported by organisational capacity and the quality of relationships among the various actors in the supply chain. In relation to this framework, the article is structured into two sections: the first outlines the state of the art of the sector, defining the interpretative framework, district structures, environmental criticalities, and the main dimensions of the digital and ecological transition, with particular attention to implications, limitations, and barriers; the second presents a critical analysis of four case studies of Italian wood-furniture companies, representing relevant examples in the adoption of integrated strategies for the dual transition, both at a macro level – referring to the company and supply chain – and at a micro level – related to the development of circular products.

The objective is to provide a synthesis of recurring evidence on environmental and economic benefits, the enabling role of digital technologies, and ecodesign strategies that characterise the ecological and digital transition of this specific sector. The results of this synthesis are useful not only for describing the current level of transition within the sector, but, above all, for addressing a significant gap in the literature: the lack of studies analysing the dual transition within fragmented district-based supply chains predominantly composed of SMEs, such as the Italian wood-furniture sector.

This perspective makes it possible to highlight conditions, barriers, and potential that rarely emerge in broader studies on digitalisation and circularity. Furthermore, the focus on Made in Italy highlights how the dual transition interacts with identity-based production models rooted in craftsmanship and territorial embeddedness, offering the international scientific community an original contribution to understanding how digital innovation and ecodesign adapt to highly artisanal manufacturing contexts.

The wood-furniture sector and Made in Italy identity | Made in Italy is a marker of recognisability and value, conveyed worldwide through excellence and industrial products – now considered icons of design – created by the diverse skills and expertise present across the country (Temperini, Gregori and Palanga, 2016). At the same time, it represents a heterogeneous and constantly evolving reality, closely linked to territorial resources, which continues to develop traditional know-how alongside the ability to trade, distribute, and communicate effectively (Bassi, 2017). This identity, built over time, can be summarised as 'beautiful and well-made', expressed through manufacturing





Figg. 9, 10 | The Catifa Carta series by Arper, available in various base configurations, highlights the product's versatility and the consistency of its formal and material identity. The shell is made of PaperShell, a material composed of 29 sheets of kraft paper (credits: Arper, 2025).

quality and the skilful integration of design, material sensitivity, and craftsmanship, passed down and renewed over the decades (Tosi, 2015; Bettiol, 2015; Dellapiana, 2022).

According to Becattini (1998), the uniqueness of industrial districts – developed during the economic boom and consolidated throughout the 1970s and 1980s – can be traced back to a process of cross-fertilisation (Ricciardi, 2013) among different business entities, most of which are family-run and deeply rooted in the territory and its material, artisanal, and cultural resources. This process has contributed to shaping the identity of the Made in Italy entrepreneurial model as it is recognised today. Furthermore, although production delocalisation and globalisation in the 1990s increased the complexity of supply chains, Made in Italy districts have maintained a driving role, also thanks to synergies between designers, artisans, and local entrepreneurs (Bassi, 2017; Cianfanelli et alii, 2018; Claudi de Saint Mihiel, 2024).

Today, there are approximately 159 industrial districts (Intesa Sanpaolo, 2025), which continue to operate to preserve and enhance this inherited identity, often renewing it over time. Among the key sectors belonging to the so-called four A's of Made in Italy – Furniture, Fashion, Agri-food, and Automotive – the Home System is one of the most dynamic (Fig. 3), consolidating its sectoral identity through a skilful dialogue between design culture rooted in craftsmanship, production capabilities, and the distinctive characteristics of the territory (Bettiol, 2015; MIMI, 2026). The process of identity construction in the furniture sector has also led to the development of several industrial excellence clusters: Brianza and the Treviso-Pordenone area for the production of panels and furniture components (Unioncamere and Centro Studi Guglielmo Tagliacarne, 2024); northern Marche for kitchen production; and Apulia as a district specialising in upholstered furniture (Intesa Sanpaolo, 2025).

Within these industrial districts, Design has played a decisive role in development and innovation, increasing brand value and strengthening the global perception of the Made in Italy identity. Companies such as Cassina, B&B Italia, Poltrona Frau, Molteni&C, Poliform, Fantoni, Kartell, and Magis have contributed – through collaborations with leading masters of design and the creation of high-quality products – to defining what is now recognised as contemporary Italian design, appreciated worldwide (Bassi, 2017). In addition, international trade fairs – above all the Salone del Mobile in Milan, which has become established as a global showcase – have promoted and conveyed the identity of Made in Italy by exhibiting innovative, well-crafted products, further boosting the entire sector.

However, in recent years, supply chains within the furniture sector have become increasingly extended and complex. This evolution is largely attributable to market instability, the growing phenomenon of mergers and acquisitions by foreign holding groups, and companies' implementation of recent ecodesign regulations. In the face of this epochal transformation, the challenge of the dual transition in the furniture sector may represent an opportunity for SMEs to enhance their sustainability, improve their digitalisation and competitiveness, develop more sustainable and circular products, and lay the foundations for new business models.

Circularity and digitalisation in the wood-furniture sector | At the European level, the wood-furniture supply chain generates approximately €140 billion in turnover. However, it is recognised as one of the sectors requiring urgent action to improve environmental sustainability. A study by the Joint Research Centre ranks the furniture sector second, after textiles and footwear, in terms of environmental impact, with most of this impact attributable to end-of-life scenarios. In Europe alone, around 10 million tonnes of furniture are discarded each year, of which 80-90% is sent to landfill or incineration, while only about 10% is recycled (Faraca et alii, 2024).

Furthermore, the complex structure of furniture – often composed of multiple materials and not designed for disassembly or maintenance – significantly limits the possibility of recovering, reusing, and valorising components and materials (Faraca et alii, 2024; Yang and Vezzoli, 2024; Maffei et alii, 2024). Product-related criticalities are compounded by issues such as planned obsolescence and short-lived furniture, which contribute to waste generation at both production and end-of-life stages (Furmston and Braithwaite, 2025).

In response to these environmental challenges, European furniture companies, including those within the Made in Italy system, are required to address the dual circular and digital transition, overcoming numerous barriers that hinder transformation. These include the fragmentation of supply chains; limited investment in technological innovation; difficulties in allocating resources for the shift toward sustainable and circular production models; cost volatility; and challenges in sourcing raw materials (Buono, Capece and Laudante, 2018). Nevertheless, Italy ranks among the leading countries in Europe in terms of overall circularity performance (Circular Economy Network, 2025).

According to the GreenItaly report by Unioncamere and Fondazione Symbola (2023), 70% of companies invest in energy efficiency, 76% select certified suppliers, and 96% adopt sustainable materials. These figures are complemented by practices such as closed-loop recycling, sourcing from geographically proximate suppliers, the establishment of sustainability management roles, and, albeit still limited, the adoption of ecodesign strategies (including modularity, disassemblability, maintainability, repairability, and upgradability) aimed at extending the useful life of furniture. This also occurs through the development of Product-as-a-Service (PaaS) models (Pietroni, Di Stefano, and Galloppo, 2023; Mesa, 2023; Wu and Pi, 2023). The growing interest among companies in circular business models, which place design at the centre, represents a significant milestone in corporate culture, given that approximately 80% of environmental impacts are determined during the design phase (Tan et alii, 2024).

The ecological transition is accompanied by an ongoing process of digitalisation within the sector, which is enhancing product performance and improving process efficiency in SMEs (Guangju et alii, 2025). The implementation of new digital technologies acts as both a facilitator of, and an operational catalyst for, circularity, making it possible to quantify and monitor various types of data to be included in the Digital Product Passport (DPP), such as product performance, traceability of ma-

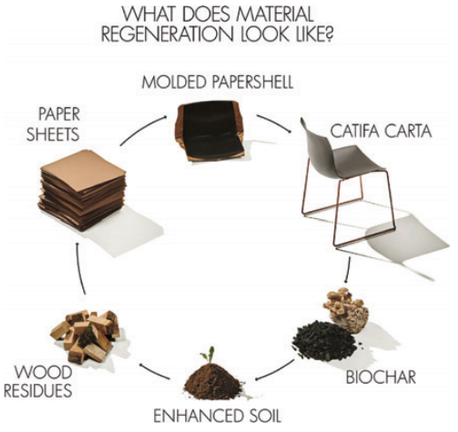


Fig. 11 | Life cycle of the Catifa Carta chair shell, which is converted into biochar at the end of its life (credit: Arper, 2025).



Fig. 12 | Details of the 'screw-spacer' jointing system between the shell and the frame of the Catifa Carta chair (credit: Arper, 2025).





Figg. 13, 14 | Drop, the modular seating system designed by Zakaria Khalfaoui for Sitland, features a fully disassemblable and configurable architecture that allows the seating layout to be adapted to a wide range of spaces and uses (credits: Sitland, 2026).

terials and components, maintenance procedures, correct end-of-life management, and supply chain transparency (Barbero and Ferrulli, 2023). IoT-based solutions – including QR codes, RFID tags, blockchain systems, data-driven platforms, and artificial intelligence – can improve control and transparency across supply chains, support demand forecasting and production planning, reduce waste and unsold stock, optimise inventory and logistics, and assess product conditions in order to extend their useful life (D'Itria, Pei and Bertola, 2024; Sardjono et alii, 2025).

Within company R&D departments, particularly during the design phase, the use of CAD/CAM tools and digital twin technologies enables product optimisation from the earliest stages of development, through predictive modelling of functional and environmental performance across the product life cycle (Pehlken et alii, 2024). Finally, given the architectural and material complexity of furniture, the adoption of Key Enabling Technologies (KETs) – already implemented in sectors such as textiles and construction – represents a promising approach to improving waste management and enhancing the traceability and usability of environmental impact data from the earliest design phases (Rigillo, Galluccio and Paragliola, 2023; Islam et alii, 2025). This process of modernisation and supply chain optimisation is also the focus of Italian research initiatives, which – supported by the MICS Foundation (Made in Italy Circolare e Sostenibile)[1] and participation in European projects – are actively addressing the furniture sector and the dual transition challenge. These initiatives are developing best practices centred on waste recovery, the creation of collaborative territorial laboratories, and the promotion of more circular and resilient supply chains through digital tools and new management models.

Given the importance of the ecological and digital transition, as highlighted in the technical-scientific literature for the Made in Italy furniture sector, a critical analysis was conducted of sustainability reports, product datasheets, and other corporate documents to examine and identify improvements associated with the adoption of digitalisation and circularity practices within business models. The investigation is structured around four case studies of Italian furniture companies and is organised into two levels: macro and micro. The macro level considers the company as a whole, analysing the adoption of digital technologies and their effects on the production system; the micro level focuses on products, examining the ecodesign strategies implemented and the integration of digital solutions. The companies were selected according to specific criteria: having an entirely Italy-based production supply chain; being members of FederlegnoArredo or sector associations such as AssoArredo and AssoLegno; having participated in competitive projects; and having received awards or recognitions for environmental sustainability, as well as obtained environmental certifications. The objective is to identify design strategies and digital technologies that are particularly significant in accelerating the dual transition within the furniture sector.

Natuzzi and Tonin Casa: digitalisation of the entire supply chain and the Digital Product Passport | The Natuzzi Group represents a significant case of integration between cyber-physical systems and circular economy principles within a highly artisanal sector (Fig. 4). Founded in 1959 in Santeramo in Colle, within the upholstered furniture district of the Murgia region, the company has developed a model based on material quality, vertical supply chain control, monitoring of production inputs, and centralised governance of internationalisation processes (Natuzzi S.p.A., 2023, 2025). At the macro level, sustainability is enabled by digital innovation, particularly through the quality of its technological ecosystem, which supports the management of flows and the reduction of waste. In 2024, Natuzzi introduced the RISE with SAP infrastructure for enterprise management and supply chain optimisation in a cloud environment, improving visibility across the entire production chain, reducing information asymmetries between design and production, and strengthening data security and regulatory compliance (SAP News Centre Italy, 2024). At the same time, the adoption of Digital Twin technology – developed within the 2Next project in collaboration with the Politecnico di Bari – has enabled the simulation of production processes and the virtual analysis of material performance. This has reduced the need for physical prototypes and laboratory testing, thereby accelerating the time-to-market of new solutions. Tangible outcomes of this system include: a reduction in production waste through AI-based algorithms, particularly in the cutting phases of semi-finished components (Fig. 5); improved resource efficiency through modelling and stochastic simulation of production lines; and optimisation of product assembly through Lean Manufacturing 4.0 methodologies and the introduction of an automated mobile assembly line.

The implementation of digital tools and advanced industrial automation technologies, combined with Natuzzi's design-for-disassembly approach, significantly simplifies end-of-life disassembly processes and ensures proper material recovery. The Natuzzi case demonstrates how the dual transition can enhance both decision-making and operational capabilities within a company, strengthening its connection to the local territory and positioning it not only as a furniture manufacturer but also as a sustainability-oriented technological ecosystem capable of transforming environmental constraints into lasting and measurable competitive advantages (Natuzzi S.p.A., 2022, 2025). However, despite the tangible benefits of the technological tools adopted by this company, it is also important to highlight their limited transferability and scalability in more critical business contexts, often characterised by restricted financial resources and limited managerial capacity. This may lead to the risk of an unequal transition within the same sector.

Within the scientific debate on the sustainability of global supply chains, information asymmetry between producers and consumers hinders the implementation of the circular economy, making the shift from purely declarative to verifiable sustainability communication a priority.

The case of Tonin Casa is a notable example of an Italian company that has chosen to adopt and integrate systems based on blockchain and artificial intelligence to convey environmental information and the ethical and material value of its products in a transparent and effective manner. Since the 1970s, Tonin Casa has been producing furniture and furnishing accessories for living and

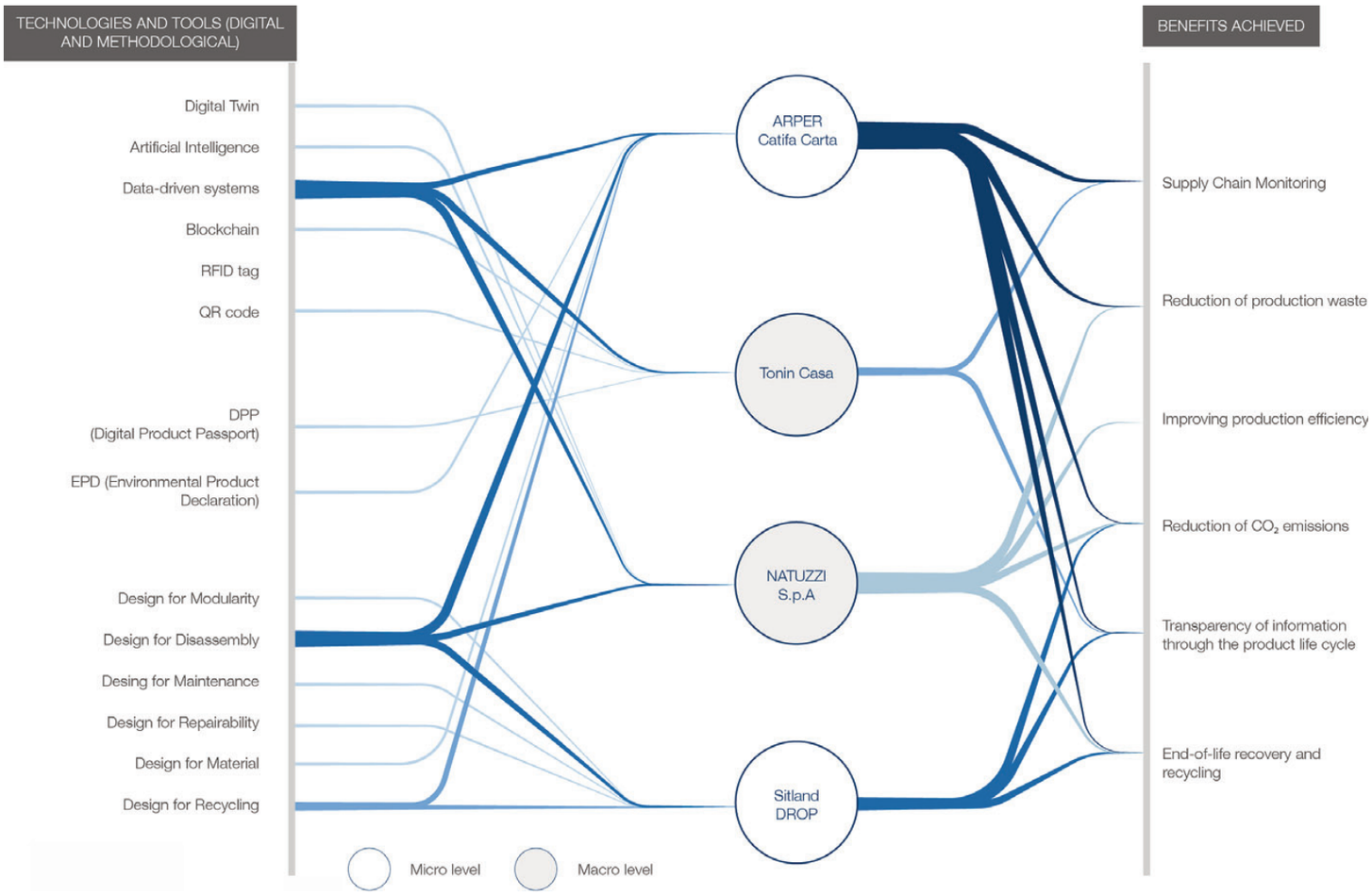


Fig. 15 | Sankey diagram analysing the systemic interrelationships between technological and methodological innovation drivers and their respective outcomes in terms of sustainability and industrial performance (credit: The Authors, 2026).

sleeping areas, with a strong focus on contemporary design and the processing of wood, glass, and ceramics (Tonin Casa, 2025). Rooted in the Padua area and active in international markets, the company has progressively oriented its strategy towards the traceability and transparency of information across the supply chain, introducing digital solutions. In collaboration with EZ Lab, an Italian start-up specialising in blockchain technology and AI-based data flow management, the company initiated the development of a Digital Product Passport (DPP) for furniture accessories, despite the absence of a fully standardised framework for this tool (EZ Lab, 2025). Through QR code solutions and Made in Block systems, it has been possible to develop the DPP, making information accessible to end users regarding the origin and certification of materials, component composition, artisanal production methods, and compliance with environmental and safety requirements.

The integration of these technologies goes beyond simple data storage, involving the creation of an infrastructure in which supply chain data – from timber sourcing to product finishing – is recorded in a Distributed Ledger Technology (DLT)-based system, validated, and organised into encrypted blocks. This architecture ensures data immutability, eliminating the risk of manipulation or greenwashing of environmental performance, transforming traceability into a scientifically verifiable system and ensuring compliance with the requirements of the DPP and the European ESPR regulation. This intelligent system for data traceability and product documentation across the entire life cycle has been applied to the company's furniture.

Among the first products to experiment with the DPP is the Lisa project (Figg. 6-8), a chair designed by Ernesto Barbieri. The Tonin Casa case study demonstrates that supply chain digitalisation, when integrated with ecodesign criteria, can generate verifiable evidence that benefits companies, consumers, production processes, and compliance with international standards, contributing to the development of a more responsible, transparent, and sustainable Made in Italy supply chain.

At the same time, the implementation of the DPP – while representing a significant step towards alignment with ESPR directives – also highlights some critical issues. In the absence of a shared European standard specifically tailored to the furniture sector, the scalability and interoperability of the system remain limited, with the risk that such initiatives will remain confined to company-specific information management, as in the case of Tonin Casa. Furthermore, while the use of blockchain and cryptographically verified records helps reduce the risk of greenwashing, the system's actual usefulness at the product's end-of-life stage remains limited due to its lack of integration with the operational platforms of waste management and recycling actors.

Arper and Sitland: material innovation and quantitative metrics of circularity and sustainability | Arper represents a regenerative business model, based on material circularity and the integration of design with biomaterial innovation. Founded in the 1970s in the Veneto production district – renowned for the manufacture of high-quality seating, tables, and furniture accessories – the company has progressively integrated digital tools to monitor its supply chain, leveraging environmental data transparency as a strategic driver of communication and market competitiveness.

Among Arper's products, Catifa Carta represents the pinnacle of the company's material research. A reinterpretation of Catifa 53, originally designed in 2001 by the Lievore Altherr Molina studio, Catifa Carta features a shell made of PaperShell, a composite material obtained from kraft paper sheets bonded with a natural resin derived from wood-processing waste (Figg. 9, 10). The uniqueness of this product lies in the material's ability to store carbon dioxide, as the CO_2 absorbed by plants during photosynthesis remains embedded in the cellulose fibres. At the end of its life cycle, the material can undergo pyrolysis, transforming it into biochar (Fig. 11), a type of plant-based charcoal that can be used as a soil amendment, with

benefits for circularity and biodiversity[2]. Despite its material excellence, it is important to note that the circular performance of this solution depends on the availability of appropriate pyrolysis facilities and on proper end-of-life waste management. It is therefore essential that the wood recovery supply chain is adequately equipped to handle innovative composite materials; otherwise, there is a risk that the material will be processed through conventional waste streams, limiting – or even worsening – the product's end-of-life performance. The material's benefits are further enhanced by the chair's design. The shell geometry is engineered to provide ergonomic support without the need for ribs or reinforcements, thereby reducing both the number of components and the amount of material used. Moreover, the simple screw-and-spacer jointing system (Fig. 12) between the base and the shell is specifically designed to facilitate complete product disassembly.

Arper has obtained several certifications that attest to its compliance with the highest international standards. Particularly noteworthy is the Environmental Product Declaration (EPD) for Catifa Carta, which positions the company as the first in Italy and the second in Europe to certify and monitor its supply chain according to the ISO 14025 standard. This declaration is based on a rigorous assessment of environmental impacts across the entire life cycle through Life Cycle Assessment (LCA). The chair is also FSC-certified for the traceability of wood-based raw materials. It holds the GreenGuard Gold certification, ensuring compliance with VOC emission limits and guaranteeing indoor air quality (Arper, 2025).

These certifications not only confirm the product's compliance with rigorous sustainability standards but also serve as objective tools for measuring environmental performance, in line with the most recent European regulations on Product Environmental Footprint (PEF; European Commission, 2021) and Environmental Product Declarations. In summary, Catifa Carta represents the outcome of a systemic approach to sustainability that integrates design for product circularity, material innovation, the adoption of digital tools for supply chain monitoring, and international environmental certifications.

The second case study examined is Sitland, a company founded in 1977 in Nanto, in the Veneto region, which represents an example of excellence in integrating quantitative metrics into furniture for office and collective spaces. In 2022, the company aligned itself with the criteria of the European ESPR regulation through the project ECONA – Our sustainable approach to design, an integrated sustainability model based on ecodesign principles and aimed at reducing waste, lowering emissions, and enhancing product circularity[3]. The modular furniture system Drop (Figg. 13, 14), designed by Zakaria Khalfaoui, is one of the company's flagship products that applies these circularity principles.

Conceived as an open ecosystem, based on three fundamental elements – seat, backrest, and armrest – it recalls the logic of drag-and-drop, allowing for flexible and intuitive configurations of waiting areas and informal workspaces. Its distinctive feature lies in the complete disassemblability of its components, achieved by avoiding the use of permanent adhesives and other irreversible connection systems[4]. This design choice facilitates maintenance and ensures that, at the end of its life cycle, each material can be directed toward appropriate recovery and valorisation processes.

The ECONA project also includes the use of a material mapping chart, a tool for classifying and communicating product material composition to consumers. This chart illustrates the percentage and type of materials used, enabling a clear understanding of the components – such as metals, textiles, and foams – and identifying which fractions can be recycled or recovered. To support the ecological transition, Sitland has introduced specific circularity indicators to provide quantitative parameters for environmental performance, assessing the regenerative value of its products, including those within the Drop system. These indicators evaluate the proportion of recycled materials used in production, the ease of disassembly, and durability – key parameters for measuring maintainability and long-term durability – ensuring a product life cycle significantly longer than industry standards.

The integration of these metrics into the Drop system enables transparent and verifiable monitoring of supply chain sustainability, generating objective data for clients, designers, and stakeholders. Drop therefore operates as both a modular and circular seating system and a concrete example of how environmental data communication – defined by the ESPR regulation and the Digital Product Passport (DPP) – can be effectively implemented. The combination of ecodesign-oriented design choices, material mapping, and the development of quantitative communication tools for circularity indicators represents a virtuous model for supporting the dual transition. This model is potentially replicable by other Made in Italy companies. However, certain conditions act as concrete barriers to its wider adoption: district proximity, the availability of an in-house research and development team, and a manufacturing culture oriented toward direct production control are difficult to replicate in fragmented or delocalised production contexts.

Through the analysis of the four case studies, a Sankey diagram (Fig. 15) was developed to illustrate the relationships among adopted ecodesign practices, digital tools, and the benefits generated by their implementation. On the left side of the diagram, the set of circular and digital transition practices adopted by the companies is presented, including data-driven systems, artificial intelligence, digital product passports, and design-for-X strategies. On the right, the diagram highlights the main benefits achieved through these strategies, including supply chain monitoring, reduced production waste, improved production efficiency, reduced carbon dioxide emissions, increased life-cycle transparency, and enhanced recovery and valorisation at the end of life. The connecting flows illustrate the relationships between the practices and tools adopted by the four companies and the benefits they generate. At the same time, their width visually emphasises the most significant and recurring connections.

Case studies and the Sustainable Development Goals of the 2030 Agenda | The dual transition process in the Made in Italy wood-furniture sector is reflected in Sustainable Development Goal (SDG) 9 of the 2030 Agenda (UN, 2015), as the digitalisation of processes and data represents a strategic lever for industrial innovation, production efficiency, and the strengthening of supply chain competitiveness.

The analysis of the case studies – conducted through a dual perspective, from macro to micro (from supply chain to product) – provides a more specific assessment of the national furniture sector in relation to targets 9.4 and 9.5. With regard to target 9.4, the case studies demonstrate that the integration of ecodesign strategies – such as reduction, disassembly, and durability – with the adoption of new digital tools effectively supports the upgrading of production processes. This generates benefits in terms of resource use, optimisation, and, more broadly, the environmental performance of furniture products.

At the same time, alignment with target 9.5 is linked to the increase in applied research conducted by the companies examined in the case studies, which is also driven by collaboration with research institutions, universities, innovation hubs, and technological districts. These collaborations aim to develop strategies and operational tools to support managerial decision-making in overcoming key barriers and limitations, particularly those related to organisational structures and the allocation of resources for investments necessary to enable the dual transition.

However, empirical evidence from the case studies also suggests interdependencies with other SDGs. In terms of synergies, the dual transition contributes significantly to SDG 12 by enhancing material traceability, measuring environmental performance, and disseminating circular design tools to support more responsible production and consumption models. SDG 8 is strengthened through processes of workforce upskilling and technological upgrading within firms, although this effect depends strongly on organisational capacity and the availability of digital skills. Finally, SDG 13 benefits from the integration of digital tools and ecodesign practices, which enable more accurate quantification and reduction of environmental impacts across the product life cycle.

Alongside these synergies, several structural trade-offs also emerge. The introduction of advanced digital technologies – such as Blockchain, Digital Product Passports, and Digital Twins – may exacerbate inequalities between well-structured firms and SMEs, raising concerns regarding equitable access to technology under SDG 10. Moreover, the implementation costs and managerial complexity of digital systems may create significant imbalances between environmental and economic-organisational sustainability, thereby limiting the scalability of these solutions.

From the perspective of data reliability and transparency, digitalisation can reduce information asymmetries; however, it may also shift the risk of greenwashing towards issues concerning the quality, interpretability, and comparability of information. Overall, the dual transition in the Made in Italy context emerges as a cross-cutting driver accelerating progress towards SDGs 9, 12, 8, and 13, while simultaneously generating new systemic asymmetries that affect the entire 2030 Agenda framework. This highlights the need for multi-level governance capable of balancing innovation, inclusiveness, and technological accessibility.

Conclusions | The analysis carried out shows that the dual transition in the Made in Italy wood-fur-

niture sector is an evolving process, characterised by heterogeneous trajectories, yet united by a progressive integration of ecodesign strategies and digital tools.

Empirical evidence from the case studies suggests that the most significant results emerge when advanced digital technologies and ecodesign practices are integrated systematically, forming a decision-making infrastructure that makes the sustainability of both products and supply chains measurable, verifiable, and operationally actionable. The adoption of technologies such as digital twins, data-driven and artificial-intelligence-based systems, value chain solutions, and other digital tools for traceability – appropriately implemented in the four analysed companies – do not merely serve as tools for improving efficiency; rather, they redefine supply chain governance, the informational quality of products, and decision-making processes oriented towards sustainability.

At the same time, ecodesign practices – including Design for Modularity, Design for Disassembly, Design for Repairability, and Design for Durability – contribute to extending product lifespans, significantly reducing carbon footprints, and enhancing end-of-life valorisation of materials and furniture components, thereby increasing their circularity. Critically, the paper highlights not only opportunities but also the vulnerabilities of a sector predominantly composed of SMEs, deeply rooted in local territories and supported by a culture of craftsmanship and know-how, which, while representing a strong identity value, may slow down the adoption of ecodesign practices and digital and technological innovation. This 'paradox of tradition' illustrates how the richness of Italian manufacturing heritage can, in some cases, hinder processes of organisational and technological transformation, especially when compared with more dynamic models adopted in other European countries.

The proposed analysis represents a relevant contribution to the scientific literature on the dual transition, which is typically focused on highly industrialised contexts. However, the study does not support generalisation of the results to the entire wood-furniture manufacturing sector. The analysed companies possess technical expertise, financial resources, and organisational capabilities that are not always present in more fragile firms in the sector. Furthermore, the lack of quantitative data on environmental performance – such as Life Cycle Assessment (LCA) studies, Carbon Footprint analyses, and circularity indicators – prevents the evaluation of performance evolution over time and systematic comparison with other European supply chains. The effectiveness of digital tools in end-of-life phases is also limited by the absence of shared standards, particularly a Digital Product Passport (DPP) specific to the wood-furniture sector, as well as by the lack of interoperable platforms across the value chain.

The transferability of the results appears feasible only under specific favourable conditions: a cohesive district-based industrial fabric, characterised by operational and cultural proximity; in-house expertise in design and research and development; shared digital infrastructures and uniform standards for data management; and financial capacity to support medium- to long-term investments. In the absence of such conditions, the dual transition risks exacerbating existing imbalances, leading to an 'uneven' transition that is difficult to scale at the sectoral level.

These limitations open up a set of relevant research questions for future research, outlining potential developments and areas still to be explored: a) further investigating how digitalisation effectively influences product circularity, through the development of comparable metrics, shared protocols, and extensive datasets that enable the evaluation of organisational and design transformations; b) examining the nature of the trade-offs generated by the introduction of complex technologies, considering management costs, the energy demands of digital systems, and the risk of emerging forms of 'digital greenwashing', particularly in the absence of third-party verification and certified procedures; c) monitoring the ongoing development of European standards for the Digital Product Passport in the furniture sector, which currently remain fragmented and not fully interoperable; d) exploring multi-level governance models capable of making digital tools accessible to SMEs, preventing innovation from remaining confined to isolated cases.

In conclusion, the dual transition emerges as an opportunity to rethink the competitive positioning of Made in Italy – as a possible evolution of its manufacturing identity rather than as a process of standardisation. The challenge will be to transform the balance between tradition and innovation into a distinctive advantage, supported by reliable data, shared standards, and an ecosystem that enables this transition to be inclusive, scalable, and culturally coherent with the specificities of the wood-furniture sector. From this perspective, future developments cannot be limited to the introduction of new technologies alone; they must encompass systemic transformations that include skills, production cultures, evaluation tools, and collaborative models capable of guiding the sector towards a new, competitive, and sustainable paradigm.

Acknowledgements

The study presented in this contribution was developed within the UNICAM Research Unit, coordinated by Prof. L. Pietroni, which has been engaged for several years in research on design for sustainability and in doctoral research on design for the circular economy, in collaboration with partner companies and consortia. In particular, the research presented in this contribution aligns with the ongoing doctoral theses of V. Giannetti and C. Di Flamminio within the National PhD Programme in Design for Made in Italy: Identity, Innovation and Sustainability, under the supervision of L. Pietroni, A. Gnaccarini, and D. Galloppo. The related doctoral scholarships were funded by the Italian Ministry of University and Research (MUR) through PNRR funds and co-financed by Cosmob (a technological centre dedicated to the manufacturing and wood-furniture sector). The Authors would like to thank the Italian Ministry of University and Research for supporting the PNRR doctoral scholarships, as well as Cosmob for its support and collaboration in promoting research on the circular economy and sustainable innovation.

Notes

1) For further information on the projects related to MICS – Made in Italy Circolare e Sostenibile, see the webpage: mics.tech/projects/ [Accessed 25 March 2026].

2) For further information on Catifa Carta, see the webpage: arper.com/it_IT/collezioni/catifa-carta.html [Accessed 25 March 2026].

3) For further information on Econa, see the webpage: sitland.com/en/sustainability/ [Accessed 25 March 2026].

4) For further information on Drop – Dripping Creativity, see the webpage: sitland.com/site/assets/files/4732/brochure_drop_sitland.pdf [Accessed 25 March 2026].

References

Antikainen, M., Uusitalo, T. and Kivikytö-Reponen, P. (2018), "Digitalization as an Enabler of Circular Economy", in Sakao, T., Lindahl, M., Liu, Y. and Dalhammar, C. (eds), *10th CIRP Conference on Industrial Product-Service Systems (IPS2 2018), Linköping, Sweden, May 29-31, 2018*, Procedia CIRP, vol. 73, Elsevier B.V., Amsterdam, pp. 45-49. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.procir.2018.04.027 [Accessed 25 March 2026].

Arper (2025), *Environmental Product Declaration – Catifa Carta*. [Online] Available at: stylecraft-web-assets.s3.ap-southeast-2.amazonaws.com/app/uploads/2022/08/09155639/Arper_EPD_CatifaCarta_ENG.pdf [Accessed 25 March 2026].

Bajardelli, L. and Bolognini Cobianchi, A. (2024), *Economia circolare per le PMI – Dalla progettazione ai finanziamenti, dall'eco-design alla comunicazione*, FrancoAngeli, Milano.

Barbero, S. and Ferrulli, E. (2023), "Transizione ecologica e digitale – Il Design Sistemico nei processi di innovazione aperta delle PMI | Ecological and digital transition – Systemic Design in SMEs open innovation processes", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 13, pp. 269-280. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/13232023 [Accessed 25 March 2026].

Bassi, A. (2017), *Design contemporaneo – Istruzioni per l'uso*, Il Mulino, Bologna.

Becattini, G. (1998), *Distretti industriale e Made in Italy – Le basi socioculturali del nostro sviluppo economico*, Bollati Boringhieri, Torino.

Ben Youssef, A. (2025), "Twin Transition – Digital Transformation Pathways for Sustainable Innovation", in *Sustainability*, vol. 17, issue 21, article 9491, pp. 1-28. [Online] Available at: doi.org/10.3390/su17219491 [Accessed 25 March 2026].

Bettiol, M. (2015), *Raccontare il Made in Italy – Un nuovo legame tra cultura e manifattura*, Marsilio Editori, Venezia.

Bettiol, M. and Micelli, S. (2005), *Design e creatività nel made in Italy – Proposte per i distretti industriali*, Mondadori Bruno, Milano.

Buono, M., Capece, S. and Laudante, E. (2018), "Design e Artigianato 4.0 – Identità culturale territoriale e innovazione", in *MD Journal*, vol. 5, pp. 28-39. [Online] Available at: materialdesign.it/media/formato2/allegati_6413.pdf [Accessed 25 March 2026].

Charter, M. (ed.) (2018), *Designing for the Circular Economy*, Routledge, London. [Online] Available at: doi.org/10.4324/9781315113067 [Accessed 25 March 2026].

Cianfanelli, E., Goretti, G., Stasi, R. and Tufarelli, M. (2018), "Saper fare del Made in Italy, tra tradizione e innovazione – Un confronto tra il comparto della pelletteria e quello dell'arredo in Toscana", in *MD Journal*, vol. 5, pp. 40-49. [Online] Available at: materialdesign.it/media/formato2/allegati_6519.pdf [Accessed 25 March 2026].

Circular Economy Network (2025), *7° Rapporto sull'e-*

conomia circolare in Italia – 2025. [Online] Available at: circulareconomynetwork.it/wp-content/uploads/2025/05/Rapporto-sulleconomia-circolare-in-Italia-2025.pdf [Accessed 25 March 2026].

Claudi de Saint Mihiel, A. (2024), "Design Made in Italy – Innovazione, ricerca e formazione | Made in Italy Design – Innovation, research and training", in *Techne | Journal of Technology for Architecture and Environment*, vol. 27, pp. 305-309. [Online] Available at: doi.org/10.36253/techne-16065 [Accessed 25 March 2026].

D'Itria, E., Pei, X. and Bertola, P. (2024), "Designing Sustainability Today – An Analytical Framework for a Design for Sustainability Model in European Fashion and Furniture Industries", in *Sustainability*, vol. 16, issue 8, article 3240, pp. 1-32. [Online] Available at: doi.org/10.3390/su16083240 [Accessed 25 March 2026].

Dellapiana, E. (2022), *Il design e l'invenzione del Made in Italy*, Einaudi, Torino.

EMF – Ellen MacArthur Foundation (2013), *Towards the circular economy – An economic and business rationale for an accelerated transition*. [Online] Available at: ellenmacarthurfoundation.org/towards-the-circular-economy-vol-1-an-economic-and-business-rationale-for-an [Accessed 25 March 2026].

European Commission (2021), *Commission Recommendation (EU) 2021/2279 of 15 December 2021 on the use of the Environmental Footprint methods to measure and communicate the life-cycle environmental performance of products and organisations*, document 32021H2279. [Online] Available at: eur-lex.europa.eu/eli/reco/2021/2279/oj [Accessed 12 April 2026]

European Union (2024), *Regulation (EU) 2024/1781 of the European Parliament and of the Council of 13 June 2024 establishing a framework for the setting of ecodesign requirements for sustainable products, amending Directive (EU) 2020/1828 and Regulation (EU) 2023/1542 and repealing Directive 2009/125/EC (Text with EEA relevance)*, document 32024R1781. [Online] Available at: eur-lex.europa.eu/eli/reg/2024/1781/oj [Accessed 25 March 2026].

EZ Lab (2025), *Tonin Casa*. [Online] Available at: ezlab.it/en/portfolio/design-blockchain-en/tonin-casa-en/ [Accessed 25 March 2026].

Faraca, G., Ranea Palma, A., Spiliotopoulos, C., Rodríguez-Manotas, J., Sanye Mengual, E., Amadei, A. M., Maury, T., Pasqualino, R., Wierzgala, P., Pérez-Camacho, M. N., Alfieri, F., Bernad Beltran, D., Lag Brotons, A., Delre, A., Perez Arribas, Z., Arcipowska, A., La Placa, M. G., Ardente, F., Mathieux, F. and Wolf, O. (2024), *Ecodesign for Sustainable Products Regulation – Study on new product priorities*, Publications Office of the European Union, Luxembourg. [Online] Available at: doi.org/10.2760/7400680 [Accessed 25 March 2026].

Furmston, K. and Braithwaite, N. (2025), "How 'Fast' is Fast Furniture?", in Laursen, L. N. and Hansen, A. K. (eds), *Proceedings of the 6th Product Lifetimes and the Environment Conference (PLATE2025), Aalborg, Denmark, July 2-4, 2025*, Aalborg University Open Publishing, Aalborg, pp. 1-8. [Online] Available at: doi.org/10.54337/plate2025-10320 [Accessed 25 March 2026].

Guangju, W., Batool, F., Hussain, S., Jabeen, M., Ali, M. and Afzal, A. (2025), "Impact of Industry 4.0 and 5.0 Technologies on Circular Economy and Sustainable Performance Using Hybrid PLS-SEM and ANN Approach", in *Human Behavior and Emerging Technologies*, vol. 2025, issue 1, article 9920983, pp. 1-15. [Online] Available at: doi.org/10.1155/hbe2/9920983 [Accessed 25 March 2026].

Hein, N., Münter, M. T. and Zimmermann, V. (2026), "Green, digital, or twin strategic orientation – What drives environmental sustainability and digitalization in German innovative SMEs?", in *Journal of Innovation & Knowledge*, vol. 12, article 100896, pp. 1-16. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.jik.2025.100896 [Accessed 25 March 2026].

Intesa Sanpaolo (2025), *Economia e finanza dei distretti industriali – Rapporto annuale*, n. 17. [Online] Available at: group.intesasanpaolo.com/content/dam/portalgroup/repository-documenti/research/it/economia-e-finanza-dei-distretti/2025/Economia_e_finanza_distretti_industriali_nr_17.pdf [Accessed 25 March 2026].

Islam, M. I., Haq, H. M., Hossain, M. F., Biswas, H. and Uddin, M. B. (2025), "Innovative Solutions for Sustainable Fashion – QR Code-Driven Pre-Consumer Waste Sorting in Garment Manufacturing", in *Materials Circular Economy*, vol. 7, article 49, pp. 1-14. [Online] Available at: doi.org/10.1007/s42824-025-00196-3 [Accessed 25 March 2026].

Kraus, S., Jones, P., Kailer, N., Weinmann, A., Chaparro-Banegas, N. and Roig-Tierno, N. (2021), "Digital Transformation – An Overview of the Current State of the Art of Research", in *SAGE Open*, vol. 11, issue 3, pp. 1-15. [Online] Available at: doi.org/10.1177/21582440211047576 [Accessed 25 March 2026].

Maffei, S., Bolzan, P., Bianchini, M., Zeccara, F., Barbero, S., Campagnaro, C., Di Prima, N., Filippini, A., Puglielli, M., Rosato, L., Lotti, G. and Pontillo, G. (2024), "Svelare la complessità della transizione circolare per il settore del mobile imbottito | Unveiling the complexity of circular transition for the upholstered furniture sector", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 16, pp. 304-313. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/16252024 [Accessed 25 March 2026].

Mesa, J. A. (2023), "Design for circularity and durability – An integrated approach from DFX guidelines", in *Research in Engineering Design*, vol. 34, pp. 443-460. [Online] Available at: doi.org/10.1007/s00163-023-00419-1 [Accessed 25 March 2026].

MIMI – Ministero delle Imprese e del Made in Italy (2026), *Made in Italy 2030 – Per una nuova strategia industriale*. [Online] Available at: mimit.gov.it/images/stories/documenti/Made_in_Italy_2030_-_Per_una_nuova_strategia_industriale.pdf [Accessed 25 March 2026].

Natuzzi S.p.A. (2025), *Annual Report on Form 20-F – 2024.* [Online] Available at: natuzzigroup.com/pdf/ir/annual-reports/annual-report-2024.pdf [Accessed 8 March 2026].

Natuzzi S.p.A. (2023), *Natuzzi Company Profile*. [Online] Available at: natuzzigroup.com/pdf/ir/NTZ_Company_Profile_May_2023.pdf [Accessed 25 March 2026].

Natuzzi S.p.A. (2022), *Annual Report on Form 20-F – 2021.* [Online] Available at: natuzzigroup.com/pdf/ir/annual-reports/annual-report-2021.pdf [Accessed 25 March 2026].

Pagoropoulos, A., Pigosso, D. C. A. and McAloone, T. C. (2017), "The emergent role of digital technologies in the Circular Economy – A review", in McAloone, T. C., Pigosso, D. C. A., Mortensen, N. H. and Shimomura, Y. (eds), *9th CIRP IPSS Conference – Circular Perspectives on Product/Service-Systems, Kongens Lyngby, Denmark, June 19-21, 2017*, Procedia CIRP, vol. 64, Elsevier B.V., Amsterdam, pp. 19-24. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.procir.2017.02.047 [Accessed 25 March 2026].

Pehlken, A., Davila, M. F., Dawel, L. and Meyer, O. (2024), "Digital Twins – Enhancing Circular Economy through Digital Tools", in Settineri, L. and Priarone, P. C. (eds), *31st CIRP Conference on Life Cycle Engineering (LCE 2024), Turin, Italy, June 19-21, 2024*, Procedia CIRP, vol. 122, Elsevier B.V., Amsterdam, pp. 563-568. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.procir.2024.01.082 [Accessed 25 March 2026].

Pietroni, L., Di Stefano, A. and Galloppo, D. (2023), "Il design modulare verso l'economia circolare – Dal 'fare per disfare' al 'fare per rifare' | Modular design towards the circular economy – From 'making to unmake' to 'making to remake'", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 14, pp. 274-283. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/14232023 [Accessed 25 March 2026].

Ricciardi, A. (2013), "I distretti industriali italiani – Recenti tendenze evolutive", in *Sinergie, rivista di studi e ricerche*, vol. 31, issue May-Aug, pp. 21-58. [Online] Available at: doi.org/10.7433/s91.2013.03 [Accessed 25 March 2026].

Rigillo, M., Galluccio, G. and Paragliola, F. (2023), "Digitale e circolarità in edilizia – Le KETs per la gestione degli scarti in UE | Digital and circularity in building – KETs for waste management in the European Union", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 13, pp. 247-258. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/13212023 [Accessed 25 March 2023].

Robertsone, G. and Lapiņa, I. (2023), "Digital transformation as a catalyst for sustainability and open innovation", in *Journal of Open Innovation | Technology, Market, and Complexity*, vol. 9, issue 1, article 100017, pp. 1-14. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.joitmc.2023.100017 [Accessed 25 March 2026].

SAP News Center Italy (2024), "Natuzzi sceglie RISE with SAP per supportare il suo progetto di trasformazione digitale e di migrazione sul cloud", in *news.sap.com*, 08/04/2024. [Online] Available at: news.sap.com/italy/2024/04/natuzzi-sceglie-rise-with-sap-per-supportare-il-suo-progetto-di-trasformazione-digitale-e-di-migrazione-sul-cloud/ [Accessed 25 March 2026].

Sardjono, W., Hidayah, A. R., Indriarto, A. E., Sarim, Radito, I. and Perdana, W. G. (2025), "The Furniture Industry's Use of Digital Supply Chain – A Sustainable Strategy for Growth and Efficiency", in *ICIMCIS 2025 – Proceedings of the 2025 International Conference on Informatics, Multimedia, Cyber and Information System, Jakarta, Indonesia, December 3-4, 2025*, IEEE, New York, pp. 610-614. [Online] Available at: doi.org/10.1109/ICIMCIS68501.2025.11327315 [Accessed 25 March 2026].

Tan, E. S. H., Lee, A. W. L., Shekar, Y. C. and Tan, Y. S. (2024), "Design for Circularity – A Framework for Sustainable Product Redesign", in Settineri, L. and Priarone, P. C. (eds), *31st CIRP Conference on Life Cycle Engineering (LCE 2024), Turin, Italy, June 19-21, 2024*, Procedia CIRP, vol. 122, Elsevier B.V., Amsterdam, pp. 479-484. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.procir.2024.01.070 [Accessed 25 March 2026].

Temperini, V., Gregori, G. L. and Palanga, P. (2016), "The Brand Made in Italy – A Critical Analysis", in *Management Studies*, vol. 4, issue 3, pp. 93-103. [Online] Available at: researchgate.net/publication/287127237_The_Brand_Made_in_Italy_A_Critical_Analysis [Accessed 25 March 2026].

Tonin Casa (2025), *Tonin Casa – Company Profile*. [Online] Available at: toninicasa.it/public/20252307-company-profile-ita-ok.pdf [Accessed 25 March 2026].

Tosi, F. (2015), "Made in Italy – L'eccellenza del saper fare", in Tosi, F., Lotti, G., Follesa, S. and Rinaldi, A. (eds), *Artigianato Design Innovazione – Le nuove prospettive del saper fare*, DIDApress, Firenze, pp. 18-25. [Online] Available at: issuu.com/dida-unifi/docs/artigianato_design_innovazione [Accessed 25 March 2026].

UN – United Nations (2015), *Transforming our World – The 2030 Agenda for Sustainable Development*, document A/RES/70/1. [Online] Available at: sdgs.un.org/2030agenda [Accessed 25 March 2026].

Unioncamere and Centro Studi delle Camere di Commercio Guglielmo Tagliacarne (2024), *Ruolo e potenziale economico della filiera del legno*. [Online] Available at: unioncamere.gov.it/sites/default/files/Ambiente/LEGNAME/IGT_Presentazione%20progetto%20legname.pdf [Accessed 25 March 2026].

Vezzoli, C. (2017), *Design per la sostenibilità ambientale – Progettare il ciclo di vita dei prodotti*, Zanichelli, Bologna.

Wu, D. and Pi, Y. (2023), "Digital technologies and product-service systems – A synergistic approach for manufacturing firms under a circular economy", in *Journal of Digital Economy*, vol. 2, pp. 37-49. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.jdec.2023.04.001 [Accessed 25 March 2026].

Yang, D. and Vezzoli, C. (2024), "Designing environmentally sustainable furniture products – Furniture-Specific Life Cycle design guidelines and a toolkit to promote environmental performance", in *Sustainability*, vol 16, issue 7, article 2628, pp. 1-26. [Online] Available at: doi.org/10.3390/su16072628 [Accessed 25 March 2026].

AGATHÓN – International Journal of Architecture, Art and Design | n. 19 | 2026 | pp. 382-399
ISSN print: 2464-9309 – ISSN online: 2532-683X | doi.org/10.69143/2464-9309/19222026

Article Info

Received 10 March 2026
Revised 16 April 2026
Accepted 16 April 2026
Published 30 June 2026

DESIGN E RICERCA ATTIVA PER GLI SDG
Ecosistemi di innovazione sostenibile

DESIGN AND ACTIVE RESEARCH FOR SDGs
Ecosystems of sustainable innovation

Matteo Oreste Ingaramo, Eugenia Carla Cosima Chiara,
André Leme Fleury, Charalampos Harris Stamatopoulos

Abstract

Gli ecosistemi di innovazione sono reti sociotecniche multilivello il cui sviluppo è determinato dalla co-progettazione, dalla governance collaborativa e dalla leadership strategica. Il presente articolo propone un quadro metodologico per valutare il contributo del design agli ecosistemi dell'innovazione a livello meso. Basato sul metodo Research Through Design lo studio combina un'analisi della letteratura, una valutazione quantitativa delle KPI assistita dall'intelligenza artificiale e interviste qualitative a esperti finalizzate ad analizzare tre ecosistemi dell'innovazione: la regione di San Paolo, la Lombardia e Stoccolma-Uppsala. I risultati suggeriscono che il design è strutturalmente presente in tutti e tre i contesti, ma in gran parte assente dai sistemi di misurazione. Lo studio conclude proponendo un programma di ricerca più ampio per la co-progettazione di infrastrutture di misurazione e politiche di design basate su dati concreti, in linea con gli SDG 9 e 17.

Innovation ecosystems are multilayered sociotechnical networks whose development is shaped by co-design, collaborative governance, and strategic leadership. This paper proposes a methodological framework to assess the design's contribution to innovation ecosystems at the meso level. Grounded in research-through-design, the study combines literature review, AI-assisted KPI estimation, and expert interviews to analyse three innovation ecosystems: the São Paulo, Lombardy, and Stockholm-Uppsala regions. The findings suggest that design is structurally present across the three contexts, but largely absent from measurement systems. The study concludes by proposing a broader research agenda for co-designing measurement infrastructures and evidence-based design policy aligned with SDGs 9 and 17.

Keywords

sviluppo sostenibile, collaborazione università-industria, ecosistemi di innovazione, industria 5.0, research through design

sustainable development, university-industry collaboration, innovation ecosystems, industry 5.0, research-through-design

Matteo Oreste Ingaramo, Architect and PhD, is an Associate Professor of Design at the Politecnico di Milano (Italy). He is the Head of Corporate Relations at the School of Design of the Politecnico di Milano. He carries out research on collaboration between the University and Industry in the design field. E-mail: matteo.ingaramo@polimi.it

Eugenia Carla Cosima Chiara, PhD, is a Designer and Researcher at the Politecnico di Milano (Italy), specialised in design for local impact. E-mail: eugenia.chiara@polimi.it

André Leme Fleury is an Associate Professor at the University of São Paulo (Brazil), working across the fields of design and engineering. A specialist in agile innovation, his research explores innovative interfaces between design and engineering. E-mail: andre.fleury@usp.br

Charalampos Harris Stamatopoulos is the Managing Director and a Board Member of Sustainability InnoCenter, an independent non-profit innovation and research centre based in Uppsala (Sweden), with a primary focus on sustainability, innovation, and strengthening the impact of research and cross-sector collaboration, including social actors. E-mail: harris.stamatopoulos@uu.se



Gli ecosistemi costituiscono reti sociotecniche multilivello attraverso le quali i sistemi prodotto-servizio vengono ideati, prodotti e diffusi collettivamente (Tsujimoto et alii, 2018). La loro nascita può derivare da dinamiche di auto-organizzazione o da interventi mirati, guidati dal design e dalla gestione (Sposito and Scalisi, 2024). Poiché i progressi tecnologici consentono sempre più la progettazione di esperienze d'uso complesse, una comprensione più profonda degli utenti rappresenta un punto di partenza fondamentale per lo sviluppo di ecosistemi integrati (Beckman, 2025). In questi contesti i metodi di co-progettazione forniscono percorsi strutturati per l'innovazione collaborativa in contesti multidisciplinari, nei quali i progettisti agiscono come orchestratori di conoscenze distribuite, facilitatori dei processi decisionali e traduttori di contributi diversi in artefatti progettuali condivisi, consentendo soluzioni coerenti, significative e sensibili al contesto (Gasparotto et alii, 2021; Paay, Kuys and Taffe, 2021; Campagnaro et alii, 2025; Mosely et alii, 2025).

Nel contesto dell'Agenda 2030 e dei suoi Obiettivi di Sviluppo Sostenibile (SDG; UN, 2015), in particolare degli SDG 9 (Industria, innovazione e infrastrutture) e 17 (Partnership per gli obiettivi), la progettazione degli ecosistemi implica la modellazione di attività umane, prodotti ed esperienze come componenti interconnesse di sistemi ecologici e sociali più ampi (Beckman, 2025); negli ultimi dieci anni è diventato sempre più urgente sviluppare approcci solidi per esplorare, misurare e analizzare l'impatto del design sugli ecosistemi dell'innovazione. Da quando il documento OCSE del 2015 (Galindo-Rueda and Millot, 2015) ha proposto un quadro di riferimento fondamentale per misurare il contributo del design all'innovazione a livello nazionale il dibattito si è notevolmente evoluto: il design è passato da un'attività estetica marginale a un motore strategico centrale dello sviluppo dell'ecosistema, della co-creazione e della trasformazione sistemica, come dimostrato dalla sua crescente integrazione nei quadri dell'Industria 5.0, nelle iniziative di economia rigenerativa e nei partenariati multistakeholder allineati agli SDG (Nahavandi, 2019; Blanco et alii, 2021; Xu et alii, 2021). Questo ruolo più ampio e sistemico richiede strumenti di misurazione in grado di andare oltre i modelli a livello micro come la 'scala del design' (Wrigley, Mosely and Tomitsch, 2018; Hyysalo et alii, 2023; Zannoni et alii, 2024; Ilhan and Özemir, 2025).

Spinti in parte dal notevole successo delle aziende tecnologiche con sede nella Silicon Valley (Katz, 2015) gli ecosistemi dell'innovazione sono stati in gran parte analizzati da una prospettiva geografica, con particolare attenzione ai contributi relativi dei diversi attori all'interno di questi cluster imprenditoriali (Startup Genome, 2025). Tuttavia il ruolo specifico del design, a partire dai suoi attori principali e dalle dinamiche distintive di orchestrazione, rimane poco esplorato all'interno degli ecosistemi di innovazione; di conseguenza, mentre è emerso un corpus sostanziale di studi sia a livello macro che micro, persiste una lacuna critica a livello meso, in cui la diffusione del design deve essere compresa alla luce delle sue specificità strutturali e contestuali sia come pratica sia come ambito di ricerca.

In questo contesto il presente documento illustra i risultati preliminari di un progetto di ricerca condotto da tre prestigiose Istituzioni accademiche e finalizzato allo sviluppo e alla verifica empirica di quadri metodologici per misurare il contributo del design all'interno di ecosistemi di innovazione a livello meso. Nello specifico lo studio analizza in che modo il design possa essere inteso come una capacità misurabile a livello di sistema, attraverso una serie strutturata di indicatori chiave di prestazione (KPI), ed esamina come tali indicatori possano essere applicati e interpretati in diversi contesti regionali e istituzionali.

La ricerca assume come questione centrale la possibilità di rendere leggibili e comparabili, in modo sistematico, i contributi relazionali, procedurali e contestuali attraverso cui il design concorre alla configurazione degli ecosistemi di innovazione. Da tale interrogativo derivano due ulteriori domande operative: in che misura i metodi assistiti dall'intelligenza artificiale possono sostenere la stima, la comparazione e la validazione di indicatori costruiti a partire da basi di dati eterogenee? E in che modo le interviste a esperti possono approfondire, qualificare e contestualizzare le forme di orchestrazione esercitate dal design a livello meso, a partire dai pattern preliminari emersi dall'analisi assistita dall'IA?

Il documento è strutturato come segue: dopo aver definito i fondamenti concettuali che collegano il design, gli ecosistemi di innovazione e gli obiettivi SDG 9 e SDG 17 presenta la metodologia 'research-through-design' e descrive lo sviluppo di due strumenti, il quadro di riferimento dei KPI a sei dimensioni e il questionario di ricerca qualitativa; a seguire riporta i risultati quantitativi e qualitativi di un'analisi comparativa sperimentale degli ecosistemi di Lombardia, Stoccolma-Uppsala e San Paolo, condotta per valutare la validità degli strumenti proposti ed esplorarne il potenziale di ulteriore perfezionamento nell'ambito di un'iniziativa di ricerca internazionale più ampia; infine discute le implicazioni, i limiti e le direzioni future dell'approccio proposto.

Il contributo scientifico dell'articolo consiste nel proporre metodi di misurazione del design attraverso un quadro teoricamente fondato, empiricamente testato e metodologicamente ibrido che rende il ruolo sistemico del design negli ecosistemi di innovazione più leggibile, comparabile e attuabile. Integrando l'analisi assistita dall'intelligenza artificiale con la validazione da parte di esperti e collocando il design in una prospettiva di livello meso allineata agli SDG, lo studio offre una lente analitica innovativa e uno strumento generativo per dare forma sia alla ricerca accademica sia alle politiche di innovazione basate su dati concreti.

Metodologia e fasi | Il presente documento illustra i risultati preliminari di un progetto di ricerca condotto da tre prestigiose istituzioni accademiche con l'obiettivo di sviluppare e verificare empiricamente dei quadri metodologici per misurare il contributo del design agli ecosistemi dell'innovazione a livello meso. Data la fase iniziale del progetto e la necessità di prototipare il suo artefatto principale, l'approccio 'research-through-design' (RTD) è stato considerato il più appropriato, in quanto supporta lo sviluppo iterativo e il perfezionamento riflessivo del quadro. L'RTD è un approccio generatore di conoscenza che integra l'indagine direttamente nell'atto stesso di progettare (Desmet, Overbeeke and Tax, 2001; Wikander, Collins and Evans, 2025): la sua importanza risiede nella capacità di confrontarsi con le dimensioni progettuali, speculative e aperte del design, che i metodi scientifici tradizionali spesso faticano a gestire (Prochner and Godin, 2022; Cash, Daalhuizen and Hekkert, 2023). L'approccio investigativo dello studio ha seguito una struttura iterativa organizzata attorno alle tre fasi principali della RTD (Costa et alii, 2018).

La prima fase, denominata Sviluppo Concettuale, ha definito le basi teoriche e analitiche dello studio attraverso una revisione narrativa della letteratura incentrata su evidenze, metriche e indicatori misurabili nell'ambito delle politiche di innovazione. La revisione è passata da quadri di riferimento generali per la misurazione del design ad approcci più specifici a livello di ecosistema, in grado di cogliere il ruolo del design su scala meso. Gli indicatori chiave di prestazione più rilevanti individuati nel quadro dell'OCSE (2015) sono stati selezionati come riferimenti fondamentali per il presente studio e riassunti nella Tabella 1.

La seconda fase, Attuazione, ha tradotto il quadro concettuale in un disegno di ricerca operativo che ha combinato la raccolta di dati quantitativi con un'indagine qualitativa strutturata. Partendo da una prospettiva quantitativa il quadro KPI a sei dimensioni risultante è stato applicato agli ecosistemi di innovazione associati alle istituzioni accademiche coinvolte nello studio, avvalendosi di strumenti assistiti dall'intelligenza artificiale per analizzare banche dati bibliometriche, registri di brevetti e set di dati relativi a startup e venture capital.

La Tabella 2 presenta una panoramica del quadro di riferimento e dei suoi 35 KPI associati. A livello qualitativo sono state condotte interviste semi-strutturate con rappresentanti di alto livello di quattro organizzazioni che coordinano gli ecosistemi, situate nei contesti urbani in cui si trovano gli Istituti accademici partecipanti. Il questionario dell'intervista semi-strutturata è stato sviluppato come complemento qualitativo al quadro KPI quantitativo e per esplorare come queste caratteristiche siano percepite, attuate e sostenute all'interno degli ecosistemi dell'innovazione (Tab. 3).

La terza fase, la Valutazione, ha valutato criticamente il quadro integrativo analizzando le convergenze e le divergenze tra i risultati quantitativi e le evidenze qualitative negli ecosistemi della Lombardia, Stoccolma-Uppsala e San Paolo. La validazione è stata rafforzata dall'inclusione di prospettive istituzionali eterogenee in tali ecosistemi. La valutazione ha generato contributi sia teorici sia pratici, pertanto il quadro risultante viene proposto come prototipo iterativo a supporto di futuri perfezionamenti nella misurazione del contributo del design agli ecosistemi di innovazione. I risultati ottenuti forniranno inoltre spunti per la fase successiva di un progetto di ricerca internazionale che esaminerà più direttamente il valore e la rilevanza del design come orchestratore degli ecosistemi di innovazione.

Per chiarire le condizioni di replicabilità dello studio il protocollo di ricerca è stato definito in modo esplicito per quanto riguarda la costruzione e la selezione degli indicatori chiave di prestazione, le procedure di stima, i criteri di validazione, la struttura delle interviste, l'inclusione organizzativa e la triangolazione, al fine di consentire una futura replicabilità. In linea con le tre fasi di ricerca e sviluppo tecnologico sopra descritte il quadro degli indicatori chiave di prestazione è stato sviluppato attraverso un processo basato sulla letteratura scientifica, fondato su studi relativi alla misurazione del



Fig. 1 | Methodology (credit: E. Chiara, 2025).

Fig. 2 | Ecosystems' geographical positioning (credit: E. Chiara, 2025).

design, alle politiche di innovazione e agli ecosistemi, con particolare riferimento all'OCSE e all'OMPI. La stima degli indicatori si è basata su fonti accessibili al pubblico e riconosciute a livello istituzionale ed è stata supportata da una procedura coerente e assistita dall'intelligenza artificiale in tutti gli ecosistemi analizzati.

La validazione si è basata sulla convergenza tra le fonti, sulla coerenza contestuale e sulla plausibilità qualitativa, con particolare attenzione alle prove basate su proxy o divergenti. Le interviste semi-strutturate derivanti dalle sei dimensioni dei KPI hanno integrato la fase quantitativa, cogliendo gli aspetti relazionali e debolmente formalizzati del contributo del design, mentre alcune organizzazioni sono state incluse per i loro riconosciuti ruoli di intermediazione e di ecosistema. Nel loro insieme la combinazione di revisione della letteratura, la stima dei KPI assistita dall'IA e le interviste agli esperti definisce un protocollo triangolato che rafforza la trasparenza, la trasferibilità e la cauta riproducibilità del quadro in condizioni di disponibilità parziale dei dati.

Sviluppo concettuale | La misurazione del design, sia come processo sia come risultato, pone notevoli sfide metodologiche. A differenza dell'innovazione tecnologica, che può essere monitorata attraverso i brevetti depositati, la spesa in ricerca e sviluppo o il lancio di prodotti, il contributo del design all'innovazione è intrinsecamente relazionale e dipende dal contesto, manifestandosi in cambiamenti nei comportamenti degli utenti, nella cultura organizzativa, nella capacità di collaborazione e nella coerenza sistemica piuttosto che in risultati distinti e quantificabili (Verganti, 2008; Deserti and Rizzo, 2014). Questa elusività è particolarmente rilevante a livello meso, dove l'unità di analisi non è né la singola impresa né l'economia nazionale, ma le strutture intermedie – tra cui cluster, reti, piattaforme e partnership – attraverso le quali gli attori del design interagiscono e co-creano valore. Affrontare questa sfida metodologica richiede quindi un disegno di ricerca volutamente multilivello.

Dal punto di vista dell'Agenda 2030 il design definisce cosa si intende per qualità, chi viene incluso e quali compromessi vengono accettati, plasmando così la resilienza degli ecosistemi dell'innovazione in quanto costrutti sociotecnici e culturali (Nahavandi, 2019). Nel contesto dell'SDG 9 il design funge da livello di traduzione fondamentale tra la possibilità tecnica e l'implementazione nel mondo reale (Barbero and Ferrulli, 2023): i metodi di service design integrano accessibilità e adattabilità nei sistemi infrastrutturali (Belluzzi Mus et alii, 2021), mentre il pensiero orientato al ciclo di vita, la modularità e l'ingegneria dei fattori umani contribuiscono a ridurre la fragilità associata all'adozione di tecnologie pulite durante l'aggiornamento industriale. Inoltre il service design abbassa le soglie di partecipazione per le PMI riducendo la complessità e i costi dei sistemi finanziari e di approvvigionamento (Kaynak, Piri and Das, 2025). Il design svolge anche un ruolo centrale nel trasformare i risultati della ricerca e sviluppo in soluzioni utilizzabili, desiderabili e implementabili in contesti con molteplici parti interessate (Norman and Verganti, 2014). A livello di infrastruttura digitale il design inclusivo garantisce che la connettività si traduca in un uso significativo al di là dei diversi vincoli linguistici, cognitivi e materiali (Belluzzi Mus et alii, 2021).

Nel contesto dell'SDG 17 il design crea valore principalmente attraverso il suo ruolo operativo nel favorire partnership più efficaci e inclusive, contribuisce a ridurre gli attriti e ad aumentare la responsabilità nei sistemi di finanziamento (Akenroye et alii, 2020), generando al contempo oggetti di confine – quali roadmap condivise, prototipi e schemi di servizio – che sostengono il trasferimento tecnologico e rafforzano la capacità di assorbimento (Brown and Katz, 2009). Inoltre il design può ridurre gli oneri amministrativi che limitano in modo sproporzionato la partecipazione delle piccole e medie imprese al business, favorendo così un accesso più equo alle opportunità di partnership (Katz, 2015). Infine migliora l'attuabilità delle politiche allineando gli incentivi istituzionali e trasformando i dati in un'in-

frastruttura decisionale utilizzabile (Akenroye et alii, 2020). Insieme l'SDG 9 e l'SDG 17 forniscono l'impalcatura normativa e analitica per un'agenda di ricerca a livello meso in grado di cogliere il contributo misurabile del design all'innovazione sistemica e multi-stakeholder.

Tenendo conto della correlazione tra la pratica del design e gli SDG 9 e 17 e basandosi sul Global Innovation Index 2024 dell'OMPI (WIPO, 2024) come riferimento strutturale, questo studio propone una valutazione quantitativa delle prestazioni degli ecosistemi guidati dal design, misurando il contributo del design alla configurazione e all'operatività degli ecosistemi di innovazione attraverso sei dimensioni. Ciascuna dimensione è stata selezionata per la sua capacità di rivelare un aspetto distinto e non ridondante del ruolo del design all'interno del più ampio sistema dell'innovazione, costituendo così un quadro analiticamente coerente ed empiricamente gestibile in contesti regionali e istituzionali diversi.

Attuazione: risultati quantitativi | Misurare il contributo del design pone notevoli sfide metodologiche, in particolare a livello di mesoscala, dove l'impatto del design è diffuso, distribuito e si estende nel tempo. Gli effetti di rete, le ricadute culturali e le trasformazioni qualitative – ad esempio un programma universitario di design che, nel corso degli anni, rimodella la cultura dell'innovazione di un ecosistema regionale di startup – sono spesso invisibili agli indicatori standard bibliometrici, finanziari o basati sulla produttività. Un'altra sfida riguarda la dimensione temporale: l'impatto del design sull'ecosistema si sviluppa attraverso cicli iterativi di prototipazione, apprendimento e adattamento che resistono a una valutazione istantanea, in particolare nelle iniziative rigenerative e allineate agli SDG.

In questo contesto i modelli linguistici di grandi dimensioni (LLM) offrono un'alternativa accessibile, poiché non richiedono né dati di addestramento etichettati né competenze tecniche specialistiche (Nava and Melis, 2024; Osello et alii, 2024; Yisha et alii, 2026). Studi recenti dimostrano sia le potenzialità sia i limiti della revisione sistematica assistita da LLM. Gartlehner et alii (2025), Insuk et alii (2025) ed Eisele-Metzger et alii (2025) hanno testato modelli quali Claude 2, Claude 3.5 Sonnet e ChatGPT-4o in attività quali l'estrazione dei dati, lo screening di titoli e abstract e la valutazione del rischio di bias, ottenendo risultati che vanno da un'accuratezza del 90% nello screening del testo completo a una concordanza da lieve a discreta in compiti più interpretativi. Tutti e tre gli studi convergono sulla stessa conclusione: i modelli LLM funzionano in modo più efficace come strumenti di supporto paralleli che operano accanto ai revisori umani, non come sostituti autonomi.

L'utilizzo di Claude Sonnet 4.6 e ChatGPT 5.1 nel presente studio è giustificato dalla corrispondenza tra le capacità tecniche di questi modelli e i requisiti metodologici del quadro analitico adottato. L'analisi richiede la comparabilità dei dati a livello interregionale, compresa la normalizzazione demografica, la conversione finanziaria e l'adeguamento della densità spaziale, operazioni che traggono vantaggio da strumenti in grado di elaborare dati eterogenei e di applicare criteri di classificazione coerenti su grandi volumi di testo. Inoltre la capacità di contesto estesa di questi modelli supporta le procedure di convalida dello studio, tra cui la triangolazione tra fonti indipendenti, la verifica dei risultati della classificazione automatica dei testi e il controllo incrociato del numero di brevetti e pubblicazioni. Nel loro insieme queste caratteristiche contribuiscono a una maggiore coerenza analitica,

Indicator	Definition
Design use / design integration	Degree to which design is incorporated into the firm's activities, ranging from marginal or cosmetic use to a central and determining role in innovation and business operations
Product innovation	Introduction of new or significantly improved goods or services by the firm
Marketing innovation	Introduction of new marketing methods, including significant changes in product presentation, promotion, or market positioning
New-to-market innovation	Introduction of an innovation that is novel to the market, rather than merely new to the firm
Innovative turnover	Proportion of firm turnover attributable to innovative products
User engagement methods	Adoption of mechanisms, such as consumer panels and other advanced approaches, to incorporate user perspectives into innovation activities
External product development reliance	Extent to which the firm depends on external actors forproduct development activities
External R&D use	Extent to which the firm relies on externally performed research and development activities or partnerships
Co-development with partners	Joint development of innovations in collaboration with external partners
Employment growth	Variation in the number of employees over the period under analysis
Value added growth	Variation in the economic value created by the firm over time
Productivity level	Firm productivity measured as gross value added per employee
Productivity growth	Variation in firm productivity over the period under analysis
R&D activity / R&D use	Presence and use of research and development activities within the firm
Innovator status	Classification of the firm as innovative on the basis of reported innovation outcomes
Turnover of design-related sectors	Revenue generated by firms whose principal economic activity is design
Gross value added of design-related sectors	Economic value created by specialised design sectors
Employment in design-related sectors	Number of persons employed in sectors specialised in design-related activities
Design-related workforce share	Proportion of the workforce employed in occupations identified as design-intensive
Design share within the KBC workforce	Share of design-related occupations within the broader knowledge-based capital workforce
Registered designs	Formal registrations of design rights intended to protect the appearance or form of products
Design activities and expenditures	Survey-based measures capturing firms' design efforts and related expenditures

Tab. 1 | Most relevant KPIs identified using the OECD (2015) framework (credit: E. Chiara, 2025).

Indicator	Definition
1. Knowledge and R&D&I	Captures design's role as a non-technological yet innovation-critical activity, emphasizing knowledge production, research infrastructure, and mechanisms for open and collaborative innovation
1.1 Design-driven R&D expenditure (% of regional GDP)	Measures the intensity of regional investment in research and development attributable to design-related innovation activities, expressed as a share of regional GDP
1.2 Design international researchers (% of total)	Measures the proportion of design-related researchers with international backgrounds, affiliations, or mobility trajectories within the regional research base
1.3 Number of dissertations and theses (last 5 years)	Counts master's dissertations and doctoral theses produced in the last five years in design and related fields involving design methods
1.4 Design research journals	Measures the number of active peer-reviewed journals dedicated to design research, including both global and regionally hosted publications
1.5 Open-source design repositories	Counts publicly accessible digital repositories related to design knowledge, such as design systems, UX, HCI, and service design resources
1.6 Open innovation platforms	Measures the number of active platforms that enable collaborative innovation, such as living labs, challenge portals, open calls, and data collaboratives
2. Design Education, Talent & Skills	Captures the ecosystem's human capital base and institutional capacity, including talent formation, educational infrastructure, professional recognition, and facilitation capability
2.1 Industry–University patents involving design filed per 100,000 inhabitants	Measures the frequency of design-related patents jointly involving universities and firms, normalised per 100,000 inhabitants
2.2 Number of design students (last 5 years)	Captures the scale of the regional design talent pipeline by counting enrolments or graduates in design-related programmes over the last five years
2.3 Number of design schools	Measures the number of accredited institutions offering degree programmes in design within the region
2.4 Number of design awards	Counts design awards received by regional actors, indicating external recognition of design excellence and visibility
2.5 Number of design process facilitators (LinkedIn)	Measures the number of professionals able to lead design and co-creation processes, identified through relevant roles and skills in professional networks
2.6 Co-produced artefacts with multi-actor contributors	Counts tangible outputs such as toolkits, playbooks, prototypes, or design systems developed collaboratively by actors from multiple institutional spheres
3. Entrepreneurship	Captures the ecosystem's capacity to translate design knowledge into viable ventures, emphasizing venture creation, university transfer, survival, and innovation outputs
3.1 Design startups founded per 100,000 inhabitants (Crunchbase)	Measures the rate of newly founded startups with design-related orientations, normalised per 100,000 inhabitants
3.2 University spin-offs per year	Counts the number of new firms created annually from university-linked knowledge, research, or technology transfer processes
3.3 Startup survival rate (3–5 years) or growth	Assesses the quality and resilience of the entrepreneurial ecosystem by measuring startup continuity or growth over a three- to five-year period
3.4 Average number of output categories per project	Measures the diversity of outputs generated by funded projects, such as publications, prototypes, pilots, or other innovation results
3.5 % seed-funded projects later securing larger grants	Captures the proportion of initially seed-funded projects that subsequently obtain larger-scale follow-on funding

Tab. 2a | Proposed Key Performance Indicator (KPI) Framework for Quantitative Analysis, based on OECD (2015) documents (credit: E. Chiara, 2025).

trasparenza e riproducibilità. Per garantire la coerenza procedurale in tutti gli esperimenti è stato utilizzato lo stesso prompt.[1]

La Tabella 4 presenta i risultati quantitativi ottenuti con Claude Sonnet 4.6 e OpenAI ChatGPT 5.1. L'analisi comparativa dei tre ecosistemi dell'innovazione rivela un andamento costante in quasi tutte le dimensioni, con Stoccolma-Uppsala in testa, la Lombardia in posizione intermedia e San Paolo in coda. Tuttavia ciascun ecosistema presenta vantaggi strutturali distintivi, rendendo difficile una semplice classificazione gerarchica. L'intensità di ricerca e sviluppo della Svezia, il più alto investimento pro capite in capitale di rischio, la più forte mobilità internazionale dei ricercatori e la connettività istituzionale più matura, ancorata al modello di governance della Tripla Elica di Vinnova e ai tassi di co-pubblicazione tra Università e industria, posizionano Stoccolma-Uppsala come l'ecosistema più sviluppato in modo completo, come si riflette nella più ampia copertura degli SDG e nei più alti tassi di sopravvivenza delle startup.

La Lombardia occupa una posizione intermedia di grande rilevanza strategica, grazie alle infrastrutture di formazione nel campo del design del Politecnico di Milano, riconosciute a livello mondiale, alla partecipazione a Horizon Europe e a una solida tradizione nel design industriale nei settori dell'arredamento, della moda e dell'automotive, nonostante la spesa nazionale in ricerca e sviluppo sia storicamente inferiore rispetto agli altri Paesi e il mercato del capitale di rischio sia meno attivo rispetto a quelli dei Paesi nordici. San Paolo, pur occupando l'ultimo posto negli indicatori pro capite relativi all'intensità di ricerca e sviluppo, ai volumi del venture capital, all'internazionalizzazione dei ricercatori e alla vita media delle startup, compensa in parte questa posizione grazie al volume assoluto di startup più elevato, alla posizione dominante nel mercato del venture capital in America Latina e alla stabilità dei finanziamenti garantita dalla costituzione della FAPESP, una caratteristica strutturale che non ha eguali in nessuno dei due ecosistemi europei.

Fondamentalmente tutti e tre gli ecosistemi affrontano la stessa sfida metodologica: l'incapacità di isolare chiaramente ricerca e sviluppo orientati al design dalla spesa più ampia per l'innovazione, che è il problema metodologico centrale che il quadro comparativo proposto deve affrontare. Nessuna delle tre regioni dispone di un quadro sistematico per la raccolta di dati specifici sul design, di conseguenza tutte le stime di questo studio si basano su indicatori proxy, triangolati tra più fonti di dati e quindi soggetti a significativa incertezza.

Tuttavia l'esercizio di stima mette in luce sia il potenziale sia i limiti della misurazione assistita dall'IA: per gli indicatori basati su banche dati struttu-

Indicator	Definition
4. Capital & Finance	Assesses the ecosystem's financial depth and innovation orientation, focusing on the resources available to sustain, validate, and scale innovation activities
4.1 Revenue from new products / services introduced in last 5 years	Measures the share of organisational revenue generated by products or services launched within the last five years
4.2 VC investment per capita	Measures the amount of venture capital invested in a region per inhabitant, indicating financing depth and scale-up potential
4.3 Public innovation funding per capita	Measures the level of public expenditure on innovation programmes relative to the regional population
4.4 Number of crowdfunded projects	Counts the number of regionally originating projects financed through crowdfunding platforms, reflecting grassroots innovation and market validation
4.5 Percentage of revenues: deep-tech vs low-tech	Measures the proportion of entrepreneurial revenue associated with deep-tech activities compared with low-tech business activities
4.6 External funding secured per unit of internal seed funding	Assesses funding leverage by comparing external follow-on resources obtained against the amount of initial internal seed funding provided
5. Connectivity & Governance	Measures the structural quality of cross-sector collaboration, emphasizing the density, continuity, and governance of university-industry-government interactions
5.1 Number of Triple Helix projects per year	Counts annual collaborative projects involving at least two of the three core institutional spheres: university, industry, and government
5.2 University-Industry co-publications (%)	Measures the percentage of academic publications produced jointly by university and industry-affiliated authors
5.3 Industry-funded academic research (%)	Captures the proportion of academic research funding originating from industry sources
5.4 Percentage of projects continuing collaboration after funding ends	Measures the share of projects whose collaborative relationships remain active after the original funding period ends
5.5 Share of projects by collaboration maturity stage	Classifies projects according to stages of collaboration development, indicating the maturity profile of ecosystem partnerships
5.6 Increase in number of partners from proposal to completion	Measures the average growth in the number of participating organisations between project proposal and project completion
5.7 Distribution of partner types	Captures the relative presence of different categories of actors, such as universities, firms, governments, NGOs, and citizens, within collaborative projects
6. Economic & Societal Impact	Evaluates the ecosystem's structural reach and normative contribution, emphasizing spatial infrastructure, SDG orientation, and demonstrable societal outcomes
6.1 Density of innovation hubs per km²	Measures the spatial concentration of hubs, labs, accelerators, and similar innovation-support infrastructures within a region
6.2 Innovation activity aligned with the SDGs (proxy)	Measures the proportion of innovation activities that can be associated with the Sustainable Development Goals, especially SDG 9 and SDG 17
6.3 Impact reports from design consultancies / industries	Counts and analyses published reports that document measurable design-related impacts such as return on investment, sustainability outcomes, or inclusion benefits
6.4 Number and distribution of SDGs addressed across funded projects	Measures both the breadth and distribution of Sustainable Development Goals addressed by funded innovation projects

Tab. 2b | Proposed Key Performance Indicator (KPI) Framework for Quantitative Analysis, based on OECD (2015) documents (credit: E. Chiara, 2025).

rate, quali brevetti, finanziamenti e iscrizioni, i sistemi di IA sono in grado di aggregare e incrociare in modo efficiente dati provenienti da più fonti; per gli indicatori più qualitativi o dipendenti da proxy, come la maturità della collaborazione, l'allineamento agli SDG e l'attribuzione della ricerca e sviluppo specifica per il design, il text mining e la classificazione assistiti dall'IA possono generare stime iniziali scalabili, sebbene queste richiedano ancora la convalida da parte di esperti. Lo sviluppo di un'infrastruttura di misurazione dedicata dovrebbe quindi essere considerato una priorità per la politica del design in tutti e tre i contesti.

Attuazione: risultati qualitativi | Sono state condotte interviste con rappresentanti di alto livello di quattro organizzazioni dell'ecosistema dell'innovazione in tre Paesi, ciascuna delle quali rappresenta un modello operativo distinto: 1) Consorzio POLI.design (Milano, Italia), un consorzio di studi di consulenza nel campo del design legato all'università; 2) PoliHub (Milano, Italia), un incubatore 'deep tech' ancorato all'Università, che recentemente si è fuso con l'incubatore della Bocconi per formare Tef Bridge (Figg. 3, 4); 3) Sustainability Innovation Centre (Uppsala, Svezia), un'organizzazione intermediaria che eroga programmi di incubazione e accelerazione finanziati dall'Unione Europea (Figg. 5, 6); 4) USP Innovation Centre (San Paolo, Brasile), un Centro di innovazione universitario incentrato sulla traduzione della ricerca fondamentale in innovazione rilevante per il mercato (Figg. 7, 8).

Sebbene queste organizzazioni occupino posizioni diverse all'interno dei rispettivi ecosistemi dell'innovazione fungono tutte da ponte tra il mondo accademico e l'industria, la ricerca e l'applicazione sul mercato, nonché tra le strutture di finanziamento sovranazionali e le iniziative imprenditoriali locali. Presso l'USP questo ruolo di ponte si concretizza nel coordinamento di gruppi di ricerca universitari multidisciplinari con organizzazioni pubbliche e private, ponendo particolare enfasi sul rafforzamento dei legami interni tra i gruppi di lavoro dei progetti e sulla traduzione della ricerca universitaria in valore per la società. POLI.design, dal canto suo, è stato istituito appositamente per consentire al Politecnico di Milano di interagire direttamente con il mondo imprenditoriale, aggirando organismi intermedi quali le associazioni di categoria, e oggi opera su scala regionale, nazionale e internazionale.

PoliHub rafforza questa intermediazione ecosistemica attraverso un modello B2B incentrato sul trasferimento tecnologico, sull'intermediazione mirata tra startup e aziende e sulla creazione di comunità, in particolare a sostegno dei gruppi di ricerca che sviluppano tecnologie a impatto infrastrut-

Section	Focus	Guiding questions
1	Role and Ecosystem Positioning	1. How would you describe your role in the regional innovation ecosystem, and how does your organisation contribute to innovation processes?
2	Design as a Strategic Capability	2. In your experience, what role does design (including service design, UX, HCI, and strategic design) play in innovation within this ecosystem? Is design central, supportive, or peripheral? At what stages of innovation is design most visible? 3. Can you provide an example in which design significantly influenced the success or direction of an innovation initiative? Did it affect collaboration, funding, market adoption, or SDG alignment?
3	Collaboration and Governance	4. How are collaborations between university, industry, and public actors structured here? Are there formal programmes, seed funding schemes, co-design workshops, or open innovation platforms? 5. What factors make collaborations continue beyond initial projects, or fail? Do funding structures, facilitation capacity, trust, or design methods play a role?
4	Talent and Entrepreneurship	6. How does this ecosystem support the transition from research and design capability into startups or spin-offs? What roles do design students, prototyping infrastructure, design awards, and industry mentorship play?
5	Capital and Scaling	7. How accessible is funding for design-driven innovation in this ecosystem, both public and private? How open is venture capital to design-led startups? What is the role of public innovation funding? Is there an orientation toward deep-tech or low-tech initiatives?
6	Impact and SDGs	8. To what extent is innovation activity in this ecosystem aligned with sustainability or the SDGs, especially SDG 9 and SDG 17? Is this alignment intentional or emergent? Is it measured? How is impact reported?
7	Ecosystem Strengths and Gaps	9. What are the main strengths of this ecosystem compared to others you know? 10. What critical capabilities are missing or underdeveloped in this ecosystem? For example, design leadership, internationalisation, industry absorption, or policy alignment?

Tab. 3 | Semi-structured interview guide used in the qualitative analysis of Design-Driven Innovation Ecosystems (credit: E. Chiara, 2025).

turale. Nel contesto di Stoccolma-Uppsala l'Uppsala SIC svolge una funzione di collegamento analoga all'interno di una struttura di governance distribuita e multilivello, definita dai quadri di partenariato dell'Unione Europea. In questa struttura i partner capofila esterni influenzano i contenuti dei programmi, mentre il Centro è responsabile del reclutamento, della valutazione e dell'attuazione operativa.

Negli ecosistemi analizzati al design viene attribuito il merito di tradurre gli SDG in orientamenti politici qualitativi allineati agli obiettivi organizzativi e di renderli operativi attraverso progetti di ricerca, sviluppo e innovazione. La Tabella 5 riassume i principali punti di forza e le criticità osservate nelle iniziative di innovazione guidate dal design sviluppate nei centri di innovazione analizzati.

Valutazione | Le interviste hanno rappresentato un elemento sia di convalida sia di complessità: non si sono limitate a confermare o confutare le stime quantitative ma hanno affinato le distinzioni concettuali tra gli ecosistemi e fornito il contesto interpretativo che giustifica l'adozione di un approccio metodologico misto. Sebbene la tabella dei KPI presenti intervalli con apparente precisione, gli intervistati hanno costantemente sottolineato l'incertezza e i limiti interpretativi sottesi a tali cifre. Ad esempio l'intervistato di POLI.design ha osservato che il design è una disciplina di natura solo parzialmente quantificabile, il che rende difficile definire e misurare KPI sia nei processi sia nei risultati, questi ultimi convalidati principalmente a livello di pratica professionale. Ciò conferma direttamente la rilevanza del problema metodologico centrale del quadro di riferimento: gli indicatori devono essere progettati con cura per cogliere le dimensioni qualitative e relazionali oltre a quelle quantitative, piuttosto che ricorrere a proxy che appiattiscono il contributo del design in esiti quantificabili. Le interviste hanno inoltre rivelato che il ruolo del design all'interno degli ecosistemi dell'innovazione è tutt'altro che omogeneo. Nelle quattro interviste, il design emerge lungo uno spettro: una capacità strategica esplicita presso l'USP (Fig. 9) e POLI.design (Fig. 10); un facilitatore sistemico integrato nella logica di creazione di imprese presso PoliHub (Fig. 11); un'influenza strutturalmente presente ma in gran parte non nominata presso il Sustainability InnoCenter di Uppsala (Fig. 12). Stoccolma-Uppsala opera attraverso il coordinamento di rete tra relativamente pochi e ben collegati attori; la Lombardia attraverso una fitta costellazione di punti di riferimento istituzionali, tra cui il Politecnico, la Bocconi, PoliHub e POLI.design, con mandati sovrapposti ma a volte scollegati; San Paolo attraverso un modello basato sui volumi e dipendente da sovvenzioni, la cui sostenibilità si basa fortemente sui finanziamenti garantiti dalla costituzione della FAPESP.

Questa varietà evidenzia differenze concrete nel mandato istituzionale (Fig. 13), nell'architettura di governance e nella portata dell'ecosistema, suggerendo che un quadro solido debba tenere conto sia dell'integrazione esplicita del design sia delle pratiche implicite, simili al design, che plasmano i programmi ecosistemici pur non recando l'etichetta di design. I risultati della collaborazione rafforzano un modello già identificato teoricamente nell'analisi dell'SDG 17: un partenariato efficace dipende in misura minore dall'esistenza di collegamenti che dalla qualità delle loro connessioni e progettare per la collaborazione significa affrontare esplicitamente queste dinamiche.

Contributi, potenzialità e limiti della ricerca | L'impiego di misurazioni assistite dall'intelligenza artificiale costituisce un contributo metodologicamente originale ma prudente dal punto di vista epistemico del presente studio. Le prove sperimentali esaminate suggeriscono che i modelli LLM possono supportare una sintesi scalabile tra fonti di dati eterogenee a una scala e a una velocità che sarebbero proibitive se si utilizzassero solo metodi manuali. Tuttavia i risultati ricorrenti degli studi di valutazione degli LLM delineano anche i limiti della loro applicazione responsabile: l'inferenza automatizzata può riprodurre i bias di misurazione esistenti, sottorappresentare la conoscenza tacita e contestualmente incorporata e generare classificazioni eccessivamente sicure in ambiti ad alta incertezza.

L'analisi comparativa presentata in questo studio rivela che il crescente contributo del design agli ecosistemi dell'innovazione è strutturalmente evidente in tutti e tre i contesti regionali esaminati, ma sistematicamente assente dai quadri di misurazione che regolano le politiche di innovazione. I risultati qualitativi introducono un'ulteriore complessità che i dati quantitativi non riescono a cogliere appieno, il che richiede che il quadro di riferimento si evolva per affrontarla. Nei contesti istituzionali esaminati il design emerge non come una capacità stabile definita in modo coerente in tutti i contesti ma come uno spettro che va dalla leadership strategica esplicita, in cui i designer sono riconosciuti come navigatori dell'incertezza produttiva, all'influenza strutturale implicita, in cui il pensiero affine al design opera senza attribuzione istituzionale.

Questo paradosso evidenzia come il progresso dell'innovazione guidata dal design sia ostacolato dalla mancanza di strumenti adeguati per rendere tale capacità comprensibile, gestibile e trasferibile a diverse scale istituzionali. Il quadro proposto di indicatori chiave di prestazione a sei dimensioni, basato sull'architettura del Global Inno-

vation Index dell'OMPI e ampliato con indicatori specifici per il design convalidati da una consultazione interdisciplinare di esperti, rappresenta un passo avanti verso il superamento di questa lacuna. Attraverso un'applicazione sistematica delle dimensioni della produzione di conoscenza, dello sviluppo del talento, della traduzione imprenditoriale, dell'orientamento al capitale, della qualità della governance e dell'impatto sociale misurate tramite proxy, il quadro consente una forma di analisi comparativa che non appiattisce la ricchezza contestuale del design in esiti quantificabili, ma distribuisce piuttosto la sua valutazione su registri relazionali, procedurali e strutturali.

Sebbene questo studio sia incentrato principalmente sugli SDG 9 e 17 il quadro proposto evidenzia anche sinergie con altri SDG. Emergono forti sinergie con l'SDG 4, in particolare attraverso la dimensione Formazione di design, talenti e competenze, e con l'SDG 8, attraverso le dimensioni Imprenditorialità e Capitale e finanza, che insieme mettono in luce il ruolo del design nella formazione dei talenti, nello sviluppo delle competenze, nella creazione di startup, nel trasferimento dal mondo accademico al mercato e nelle attività economiche ad alta intensità di conoscenza. Gli effetti indiretti possono estendersi anche agli SDG 10, 11, 12 e 13, nella misura in cui il design può sostenere l'inclusione, l'accessibilità, logiche di produzione sostenibili e sistemi sociotecnici più resilienti. Questi benefici coesistono tuttavia con importanti compromessi: il rafforzamento dell'ecosistema può intensificare la concentrazione delle risorse, escludere attori vulnerabili, riprodurre pregiudizi attraverso la classificazione assistita dall'IA e incoraggiare interpretazioni iper-metriche dei processi di innovazione.

Conclusioni e sviluppi futuri | Il design può essere inquadrato all'interno delle metriche dell'innovazione come una dimensione costitutiva della coerenza dell'ecosistema, in quanto determina la qualità delle partnership, la comprensibilità dei risultati di ricerca, sviluppo e innovazione per utenti e investitori, l'architettura dell'accesso ai finanziamenti pubblici e la capacità degli attori istituzionali di gestire l'incertezza produttiva. La progettazione di quadri di indicatori chiave di prestazione e di protocolli di classificazione è, nei termini adottati in questo studio, un problema di progettazione nello stesso senso della progettazione di manufatti fisici o di esperienze di servizio: comporta decisioni su cosa rendere visibile, chi includere, quali compromessi rendere leggibili e come la coerenza sistemica sia prodotta attraverso la disposizione delle parti costituenti.

Sebbene la presente analisi abbia ancora carattere sperimentale ed esplorativo, e serva principalmente a verificare la validità analitica e il potenziale interpretativo dei modelli proposti, i tre ecosistemi esaminati rivelano architetture di governance distinte. San Paolo incarna un modello basato sui volumi e ancorato alle sovvenzioni, che combina una stabilità di finanziamento strutturalmente garantita con un forte slancio innovativo assoluto; la Lombardia è caratterizzata da una fitta costellazione di punti di riferimento istituzionali, sostenuta da una formazione nel design di livello mondiale e da un Patrimonio industriale; Stoccolma-Uppsala rappresenta invece un modello coordinato in rete in cui il design sembra essere pienamente integrato nella politica formale dell'innovazione, favorendo così un più ampio allineamento agli SDG e una maggiore resilienza dell'ecosistema.

Tuttavia il limite più rilevante del presente studio costituisce anche la sua opportunità più promettente: nessuna delle tre regioni oggetto di analisi dispone di un'infrastruttura dedicata alla misurazione del design. Ogni stima prodotta deriva da indicatori surrogati, elaborati attraverso un'improvvisazione metodologica, e soggetta a margini di incertezza che non sarebbero accettabili in ambiti di misurazione più consolidati. Non si tratta di un fallimento del disegno di ricerca; è una diagnosi accurata di una lacuna a livello di campo, il cui superamento costituisce la giustificazione principale del programma di ricerca che questo studio avvia. Il presente studio offre un quadro di riferimento per avviare tale lavoro, con attenzione, in modo comparativo e con la piena consapevolezza che i risultati più importanti devono ancora essere prodotti.

Il lavoro futuro mira a tradurre questi risultati in un programma interistituzionale guidato da designer, incentrato su un'infrastruttura di misurazione co-progettata, sullo scambio di competenze tra ecosistemi e sullo sviluppo di politiche basate su dati concreti tra i centri di innovazione. L'ambizione è produrre linee guida pertinenti per rafforzare il ruolo del design negli ecosistemi dell'innovazione, stabilire le condizioni istituzionali in cui tale ruolo possa essere continuamente esaminato, perfezionato e reso operativo in contesti di governance diversi e promuovere la creazione di nuovi artefatti attraverso una prospettiva di ricerca attraverso il design. L'allineamento di questo programma con gli SDG 9 e 17 non è retorico: entrambi gli obiettivi stabiliscono imperativi normativi per un'infrastruttura di innovazione resiliente e inclusiva e per la qualità dei partenariati multistakeholder, che possono essere affrontati solo attraverso il design e valutati attraverso quadri di misurazione sufficientemente sofisticati da cogliere il contributo costitutivo, non periferico, del design.

Ecosystems constitute multilayered sociotechnical networks through which product-service systems are collectively created, delivered, and sustained (Tsujimoto et alii, 2018). Their emergence may result from self-organising dynamics or from deliberate managerial and design-led intervention (Sposito and Scalisi, 2024). As technological advances increasingly enable the design of complex customer experiences, a deeper understanding of users becomes a critical starting point for developing integrated ecosystems (Beckman, 2025). Within these contexts, co-design methods provide structured pathways for collaborative innovation in multidisciplinary settings, with designers acting as orchestrators who integrate distributed knowledge, facilitate decision-making, and translate diverse contributions into shared design artefacts, enabling coherent, meaningful, and context-sensitive solutions (Gasparotto et alii, 2021; Paay, Kuys and Taffe, 2021; Campagnaro et alii, 2025; Mosely et alii, 2025).

In the context of the 2030 Agenda (UN, 2015), specifically SDG 9 (Industry, Innovation, and Infrastructure) and SDG 17 (Partnerships for the Goals), ecosystem design involves shaping human activities, products, and experiences as interrelated components of broader ecological and social systems (Beckman, 2025). From this perspective, the development of robust approaches to exploring, measuring, and analysing the impact of design on innovation ecosystems has become increasingly urgent over the past decade.

Since the OECD's landmark 2015 working paper (Galindo-Rueda and Millot, 2015) proposed a foundational framework for measuring design's contribution to innovation at a national level, the debate has evolved considerably. Design has moved from being a peripheral aesthetic activity to a central strategic driver of ecosystem development, co-creation, and systemic transformation, as demonstrated by its growing integration into Industry 5.0 frameworks, regenerative economy initiatives, and SDG-aligned multi-stakeholder partnerships (Nahavandi, 2019; Blanco et alii, 2021; Xu et alii, 2021). This broader and more systemic role requires measurement instruments capable of moving beyond micro-level models such as the 'design ladder' (Wrigley, Mosely and Tomitsch, 2018; Hysalo et alii, 2023; Zannoni et alli, 2024; Ilhan and Özemir, 2025).

Driven in part by the remarkable success of Silicon Valley-based technology companies (Katz, 2015), innovation ecosystems have largely been examined through a geographic lens, with considerable attention to the relative contributions of different actors within these entrepreneurial clusters (Startup Genome, 2025). However, the specific role of design, including its principal actors and distinctive orchestration dynamics, remains underexplored within innovation ecosystems. As a result, while a substantial body of scholarship has emerged at both the macro and micro levels, a critical gap persists at the meso level, where the diffusion of design must be understood in light of its structural and contextual specificities as both a practice and a research domain.

This paper presents the preliminary results of a research project conducted by three leading academic institutions and aimed at developing and empirically testing methodological frameworks to measure the contribution of design to innovation ecosystems at the meso level. Specifically, the study investigates how design can be operationalised as a measurable, system-level capability through a structured set of Key Performance Indicators (KPIs), and examines how these indicators can be applied and interpreted across different regional and institutional contexts.

The research is guided by the following overarching question: how can design's relational, processual, and context-dependent contributions to innovation ecosystems be systematically captured and compared? Two specific questions arise from this investigation: first, to what extent can AI-assisted methods support the estimation and validation of such indicators across heterogeneous data sources? Second, how can expert interviews reveal the distinctive aspects of design orchestration at the meso level, building on the initial patterns identified through AI-assisted analysis?

The paper is structured as follows: first, it establishes the conceptual foundations linking design, innovation ecosystems, and the SDG 9 and SDG 17 agendas; second, it presents the Research-through-Design (RTD) methodology and describes the development of two research artefacts: the six-dimensional KPI framework and the qualitative research questionnaire; third, it reports

KPI	Indicator	São Paulo (Brazil)			Lombardy (Italy)			Stockholm-Uppsala (Sweden)		
		Claude (min)	Claude (max)	GPT	Claude (min)	Claude (max)	GPT	Claude (min)	Claude (max)	GPT
1.1	Design-driven R&D expenditure (% of regional GDP)	0.15	0.2	0.1	0.18	0.25	0.13	0.35	0.45	0.44
1.2	Design international researchers (% of total)	8	12	8	25	30	14	35	40	22
1.3	Number of dissertations and theses (last 5 years)	2,800	3,500	450	3,000	4,000	700	1,200	1,800	350
1.4	Design research journals	3	5	1	5	8	2	3	5	1
1.5	Open-source design repositories	15	25	25	30	50	40	25	40	30
1.6	Open innovation platforms	20	30	8	25	35	12	30	40	10
2.1	Industry-University patents involving design filed per 100,000 inhabitants	0.8	1.2	0.6	2.5	3.5	1.5	4	6	2
2.2	Number of design students (last 5 years)	45,000	80,000	10,000	25,000	35,000	8,500	10,000	15,000	1,800
2.3	Number of design schools	35	45	18	20	25	12	8	12	7
2.4	Number of design awards	150	250	35	400	600	120	200	350	45
2.5	Number of design process facilitators (source: LinkedIn)	3,000	5,000	6,500	4,000	6,000	9,000	2,500	4,000	5,200
2.6	Count of co-produced artefacts (open toolkits, shared playbooks, design systems, public prototypes) with multi-actor contributors	30	50	40	50	80	75	40	70	55
3.1	Design startups founded per 100,000 inhabitants (source: Crunchbase)	1.5	2.5	4	2	3	5.5	3.5	5	5
3.2	University spin-offs per year (source: Crunchbase)	25	40	60	30	45	90	35	50	45
3.3	Startup survival rate (3–5 years) or growth rate	55	65	55	60	70	60	70	78	75
3.4	Average number of output categories generated per project	2.5	3.5	3.8	3	4	4.2	3.5	4.5	4
3.5	% of seed-funded projects that later secure larger grants or external calls	25	35	28	30	40	34	40	50	40
4.1	Revenue from new products or services introduced in the last five years	12	18	11	15	22	14	20	28	16

Tab. 4a | Quantitative data from the ecosystems analysis (credit: E. Chiara, 2025).

KPI	Indicator	São Paulo (Brazil)			Lombardy (Italy)			Stockholm-Uppsala (Sweden)		
		Claude (min)	Claude (max)	GPT	Claude (min)	Claude (max)	GPT	Claude (min)	Claude (max)	GPT
4.2	Venture capital investment per capita (source: Crunchbase)	25	35	30	40	60	88	350	500	545
4.3	Public innovation funding per capita	35	50	22	80	120	60	200	300	110
4.4	Number of crowdfunded projects (source: Kickstarter)	200	400	95	300	500	1,164	400	700	180
4.5	Share of revenues: deep-tech vs low-tech (source: Crunchbase)	30	70	35	45	55	42	55	45	55
4.6	External funding secured per unit of internal seed funding	2.5	4	3	3	5	4.2	4	7	5
5.1	Number of Triple Helix projects per year	80	120	120	100	150	180	120	180	140
5.2	University–industry co-publications (% of total)	5	8	4.5	8	12	6.5	12	16	8
5.3	Industry-funded academic research (% of total research funding)	8	12	8	12	18	10	15	20	12
5.4	% of projects that continue collaboration after funding ends	30	40	42	35	45	49	45	55	55
5.5	Share of projects by collaboration maturity stage	50-35-15		35-40-25	35-40-25		25-45-30	25-40-35		20-45-35
5.6	Increase in number of partners from proposal stage to project completion	10	20	1.8	15	25	2.1	20	30	2.4
5.7	Distribution of partner types (university, industry, public sector, NGO)	30-40-20-10		32-38-24-6	25-45-20-10		28-41-22-9	30-35-25-10		26-39-23-12
6.1	Density of innovation hubs per km²	0.03	0.05	4,00E-04	0.02	0.04	0.002	0.05	0.06	0.001
6.2	Innovation activity aligned with the SDGs (using an appropriate proxy)	35	45	38	45	55	44	55	65	52
6.3	Impact reports from design consultancies and industries	10	20	45	25	40	60	20	35	30
6.4	Number and distribution of SDGs addressed across funded projects	12	14	11	13	15	13	15	17	14

Tab. 4b | Quantitative data from the ecosystems analysis (credit: E. Chiara, 2025).

quantitative and qualitative findings from an experimental comparative analysis of the Lombardy, Stockholm-Uppsala, and São Paulo ecosystems, conducted to assess the validity of the proposed tools and to explore their potential for further refinement within a broader international research initiative; and finally, it discusses the implications, limitations, and future directions of the proposed approach. Its scientific contribution lies in advancing the measurement of design by proposing a theoretically grounded, empirically tested, and methodologically hybrid framework that makes design's systemic role in innovation ecosystems more legible, comparable, and actionable. By integrating AI-assisted analysis with expert validation and situating design within a meso-level perspective aligned with the SDGs, the study offers a novel analytical lens and a generative instrument to inform both academic research and evidence-based innovation policy.

Methodology and phases | This paper presents preliminary outcomes from a research project conducted by three leading academic institutions to develop and empirically examine methodological frameworks for measuring the contribution of design to innovation ecosystems at the meso level. Given the project's early stage and the need to prototype its central artefact, research-through-design (RTD) is the most appropriate research approach, as it supports iterative development and reflective refinement of the framework. RTD is a knowledge-generating approach that embeds inquiry directly within the act of designing (Desmet, Overbeeke and Tax, 2001; Wikander, Collins and Evans, 2025). Its significance lies in its capacity to engage with the projective, speculative, and open-ended dimensions of design, which traditional scientific methods often struggle to navigate (Prochner and Godin, 2022; Cash, Daalhuizen and Hekkert, 2023). The study's investigative approach followed an iterative structure organised around RTD's three main phases (Costa et alii, 2018).

The first phase, Conceptual Development, established the study's theoretical and analytical foundations through a narrative literature review focused on evidence, metrics, and measurable indicators in innovation policy. The review progressed from broad design measurement frameworks to more specific ecosystem-level approaches that capture design's role at the meso-scale. The most relevant KPIs identified in the OECD (2015) framework were selected as foundational references for the present study and are summarised in Table 1.

The second phase, Implementation, translated the conceptual framework into an operational research design that combined quantitative data collection with structured qualitative inquiry. From a quantitative perspective, the resulting six-dimensional KPI framework was applied to the innovation ecosystems associated with the academic institutions involved in the study, drawing on commercial AI-assisted tools to analyse bibliometric databases, patent registries, and start-up and venture capital datasets.

Table 2 presents an overview of the framework and its 35 associated KPIs. Qualitatively, semi-structured interviews were conducted with senior representatives of four ecosystem-orchestrating organisations located in the urban contexts in which the participating academic institutions are embedded. The semi-structured interview questionnaire was developed as a qualitative complement to the quantitative KPI framework and to explore how these features are perceived, enacted, and sustained within innovation ecosystems (Tab. 3). The third phase, Evaluation, critically assessed the integrative framework by analysing convergences and divergences between quantitative results and qualitative evidence across the Lombardy, Stockholm-Uppsala, and São Paulo ecosystems. Validation was strengthened by the inclusion of heterogeneous institutional perspectives across these ecosystems. The evaluation generated both theoretical and practical contributions, and the resulting framework is therefore proposed as an iterative prototype to support future refinement in measuring design's contribution to innovation ecosystems. The results obtained will also inform the next phase of this international research project,

Organisation	Strengths	Pain Points
InovaUSP	Good external promotion capacity for low-tech; strong FAPESP / Embrapii support for deep-tech	Dependence on government funding process gaps despite sound mechanisms
POLI.design	Strong university-industry relationships; design as a mindset for both competitiveness and SDGs; growing potential in community design and policy design	Design KPIs are difficult to measure in terms of both processes and outcomes
PoliHub	Extraordinary talent pipeline from Politecnico; strong network including Politecnico-Bocconi foundation (Tef Bridge merger)	Lack of entrepreneurship education alongside technical education; supply-chain discontinuities (universities produce knowledge based on researchers' interests, not business needs)
Uppsala SIC	Embedded in EU frameworks; operational flexibility within supranational structures	Limited autonomy to embed design as a distinct capability; programme content shaped externally

Tab. 5 | Strengths and pain points from the analysed innovation centres (credit: E. Chiara, 2025).



Fig. 3 | PoliHub start-up (credit: PoliHub, 2025).



Fig. 4 | PoliHub start-up team (credit: PoliHub, 2025).

which will examine more directly the value and relevance of design as an orchestrator of innovation ecosystems.

To clarify the study's replicability conditions, the research protocol is made explicit in terms of KPI construction and selection, estimation procedures, validation criteria, interview design, organisational inclusion, and triangulation for future replication. Consistent with the three RTD phases described above, the KPI framework was developed through a literature-informed process grounded in design measurement, innovation policy, and ecosystem studies, with particular reference to OECD and WIPO. Indicator estimation relied on publicly accessible, institutionally recognised sources, supported by a consistent AI-assisted procedure across the ecosystems analysed.

Validation was based on convergence across sources, contextual coherence, and qualitative plausibility, with particular caution regarding proxy-based or divergent evidence. Semi-structured interviews derived from the six KPI dimensions complemented the quantitative stage by capturing relational and weakly formalised aspects of design contribution, while selected organisations were included for their recognised intermediary and ecosystem-level roles. Taken together, the combination of literature review, AI-assisted KPI estimation, and expert interviews defines a triangulated protocol that strengthens the transparency, transferability, and cautious reproducibility of the framework under conditions of partial data availability.

Conceptual development | Measuring design, both as a process and as an outcome, poses substantial methodological challenges. Unlike technological innovation, which can be tracked through patent filings, R&D expenditure, or product launches, design's contribution to innovation is inherently relational and context-dependent, manifesting in shifts in user behaviour, organisational culture, collaborative capacity, and systemic coherence rather than in discrete, countable outputs (Verganti, 2008; Deserti and Rizzo, 2014). This elusiveness is particularly relevant at the meso-level, where the unit of analysis is neither the individual firm nor the national economy, but the intermediate structures, including clusters, networks, platforms, and partnerships, through which design actors interact and co-create value. Addressing this methodological challenge therefore requires a deliberately multi-layered research design.

From the perspective of the 2030 Agenda, design frames what quality means, who is included, and which trade-offs are made, thereby shaping the resilience of innovation ecosystems as sociotechnical and cultural constructs (Nahavandi, 2019). Within the context of SDG 9, design serves as a critical translation layer between technical possibility and real-world implementation (Barbero and Ferrulli, 2023). Service design methods embed accessibility and adaptability into infrastructure systems (Belluzzi Mus et alii, 2021), while lifecycle thinking, modularity, and human factors engineering help reduce the fragility associated with adopting clean technologies during industrial upgrading. In addition, service design lowers participation thresholds for SMEs by reducing the complexity and costs of financial and procurement systems (Kaynak, Piri and Das, 2025). Design also plays a central role in transforming R&D outputs into usable, desirable, and deployable solutions across multi-stakeholder contexts (Norman and Verganti, 2014). At the level of digital infrastructure, inclusive design ensures that connectivity is translated into meaningful use across diverse linguistic, cognitive, and material constraints (Belluzzi Mus et alii, 2021).

Within the context of SDG 17, design creates value primarily through its operational role in enabling more effective and inclusive partnerships. It helps reduce friction and increase accountability in financing systems (Akenroye et alii, 2020), while also generating boundary objects, such as shared roadmaps, prototypes, and service blueprints, that support technology transfer and strengthen absorptive capacity (Brown and Katz, 2009). In addition, design can reduce the administrative burdens that disproportionately limit SME participation in trade, thereby fostering more equitable access to partnership opportunities (Katz, 2015). It also enhances policy implementability by aligning institutional incentives and transforming data into usable decision-making infrastructure (Akenroye et alii, 2020). Together, SDG 9 and SDG 17 provide the normative and analytical scaffolding for a meso-level research agenda capable of capturing design's measurable contribution to systemic, multi-stakeholder innovation.

Considering the alignment between design practice and SDGs 9 and 17, and building on the WIPO Global Innovation Index 2024 (WIPO, 2024) as a structuring reference, this study proposes a quantitative assessment of design-driven ecosystem performance, measuring the contribution of design to the configuration and operationalisation of innovation ecosystems, across six dimensions. Each dimension is selected for its capacity to reveal a distinct, non-redundant aspect of design's role within the broader innovation system, thereby constituting a framework that is both analytically coherent and empirically tractable across diverse regional and institutional contexts.

Implementation: quantitative results | Measuring design contribution poses substantial methodological challenges, particularly at the meso-scale,

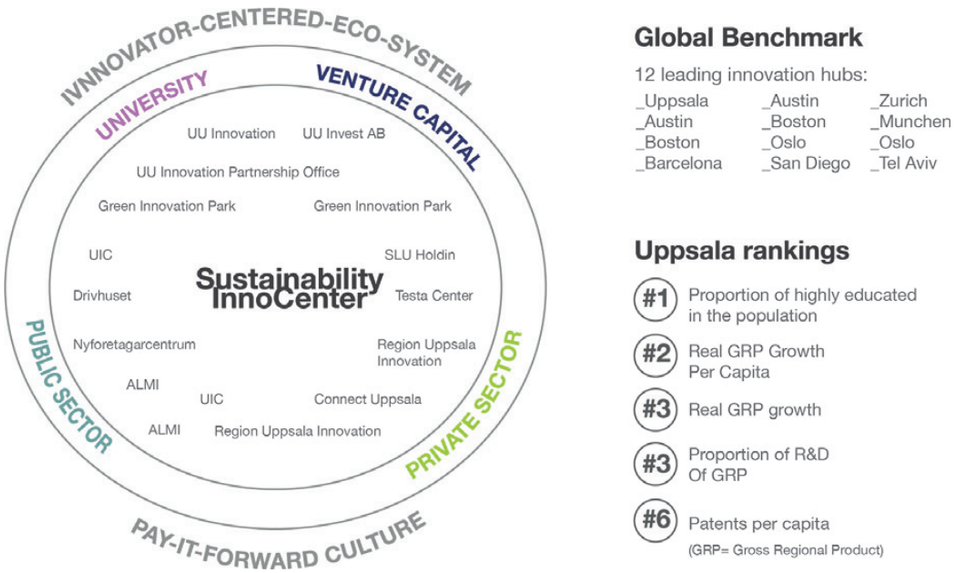


Fig. 5 | Innovation Ecosystem Uppsala (credit: Stuns, Sic 2025).



Fig. 6 | Innovation Hub Uppsala opening (credit: Innovation Hub 2025).

where design impact is diffuse, distributed, and temporally extended. Network effects, cultural spillovers, and qualitative transformations, such as a university design programme reshaping a regional start-up ecosystem's innovation culture over years, are often invisible to standard bibliometric, financial, or productivity-based indicators. Another challenge concerns the temporal dimension: design's ecosystem impact unfolds through iterative cycles of prototyping, learning, and adaptation that resist snapshot evaluation, particularly in regenerative and SDG-aligned initiatives.

In this context, Large Language Models (LLMs) offer an accessible alternative, as they require neither labelled training data nor specialised technical expertise (Nava and Melis, 2024; Osello et alii, 2024; Yisha et alii, 2026). Recent studies demonstrate both the promise and the limits of LLM-assisted systematic review. Gartlehner et alii (2025), Insuk et alii (2025), and Eisele-Metzger et alii (2025) tested models including Claude 2, Claude 3.5 Sonnet, and ChatGPT-4o across data extraction, title-and-abstract screening, and risk-of-bias assessment, achieving results ranging from 90% accuracy in full-text screening to only slight-to-fair agreement in more interpretive tasks. All three studies converge on the same conclusion: LLMs function most effectively as parallel support tools operating alongside human reviewers, not as autonomous replacements.

The use of Claude Sonnet 4.6 and ChatGPT 5.1 in this study is justified by the alignment between these models' technical capabilities and the methodological requirements of the adopted analytical framework. The analysis requires cross-regional data comparability, including population normalisation, financial conversion, and spatial density adjustment, which benefit from tools capable of processing heterogeneous data formats and applying consistent classification criteria across large volumes of text. Moreover, the extended context capacity of these models supports the study's validation procedures, including triangulation across independent sources, verification of automated text classification outputs, and cross-checking of patent and publication counts. Together, these characteristics contribute to greater analytical consistency, transparency, and reproducibility. To ensure procedural consistency, the same prompt[1] was used in all experiments.

Table 4 presents quantitative results generated using Claude Sonnet 4.6 and OpenAI ChatGPT 5.1. The comparative analysis of the three innovation ecosystems reveals a consistent gradient across nearly all dimensions, with Stockholm-Uppsala leading, Lombardy occupying an intermediate position, and São Paulo trailing. However, each ecosystem presents distinctive structural advantages, making a simple hierarchical ranking difficult. Sweden's R&D intensity, the highest per-capita VC investment, the strongest international researcher mobility, and the most mature institutional connectivity anchored by Vinnova's Triple Helix governance model and university-industry co-publication rates position Stockholm-Uppsala as the most comprehensively developed ecosystem, as reflected in the broadest SDG coverage and the highest start-up survival rates.

Lombardy occupies a strategically significant middle ground, leveraging the Politecnico di Milano's globally ranked design education infrastructure, participation in Horizon Europe, and a deep

industrial design tradition across the furniture, fashion, and automotive sectors, despite Italy's historically lagging national R&D spending and an underdeveloped VC market relative to its Nordic peers. São Paulo, while ranking lowest on per-capita indicators for R&D intensity, VC density, researcher internationalisation, and start-up survival, partly offsets this position through the largest absolute startup volume, Latin America's dominant VC market position, and FAPESP's constitutionally guaranteed funding stability, a structural feature unmatched in either European ecosystem.

Critically, all three ecosystems face the same fundamental measurement challenge: the inability to cleanly isolate design-driven R&D from broader innovation expenditure, which is the core methodological problem the proposed comparative framework is designed to address. None of the three regions has a systematic framework for collecting design-specific data. As a result, all estimates in this study rely on proxy indicators, triangulated across multiple data sources and therefore subject to significant uncertainty.

Nevertheless, the estimation exercise highlights both the potential and the limitations of AI-assisted measurement. For indicators based on structured databases, such as patents, funding, and enrolment, AI systems can efficiently aggregate and cross-reference data from multiple sources. For more qualitative or proxy-dependent indicators, such as collaboration maturity, SDG alignment, and design-specific R&D attribution, AI-assisted text mining and classification can generate scalable initial estimates, although these still require expert validation. The development of dedicated measurement infrastructure should therefore be regarded as a priority for design policy in all three contexts.

Implementation: qualitative results | Interviews were conducted with senior members representatives of four innovation ecosystem organisations across three countries, each representing a distinct operational model: 1) Consorzio POLI.design (Milan, Italy), a university-linked design consultancy consortium; 2) PoliHub (Milan, Italy), a university-anchored deep tech incubator, which re-

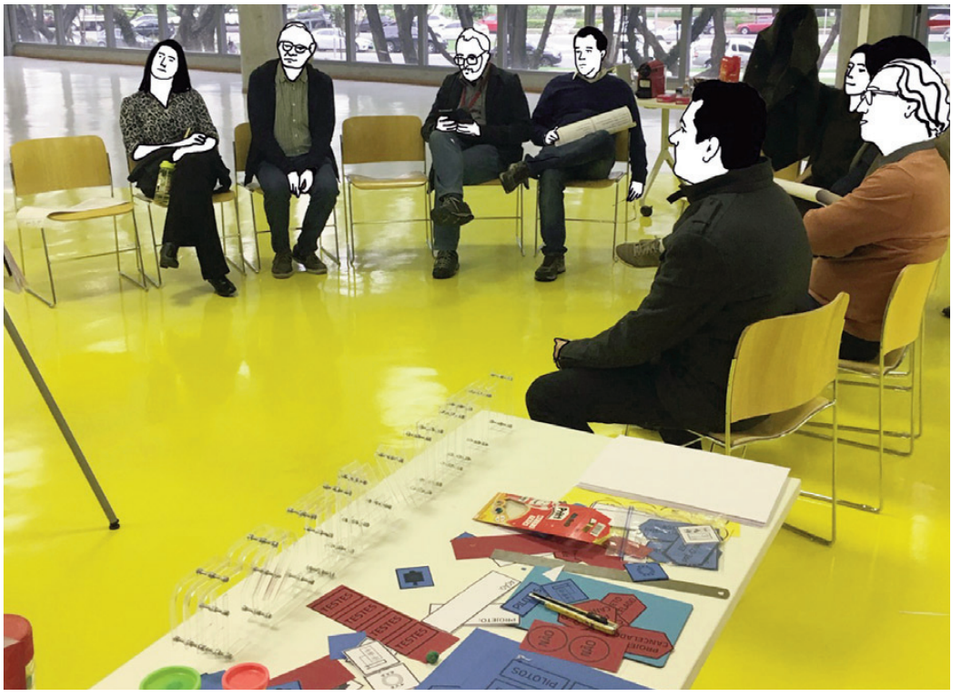


Fig. 7 | InovaUsp co-design session (credit: InovaUsp, 2025).



Fig. 8 | InovaUsp co-design session (credit: InovaUsp, 2025).

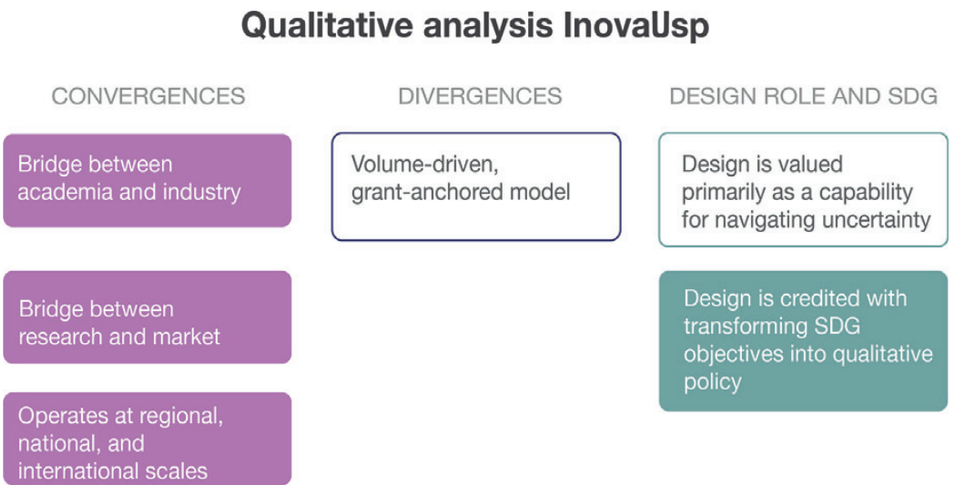


Fig. 9 | Qualitative analysis of InovaUsp (credit: E. Chiara, 2025).

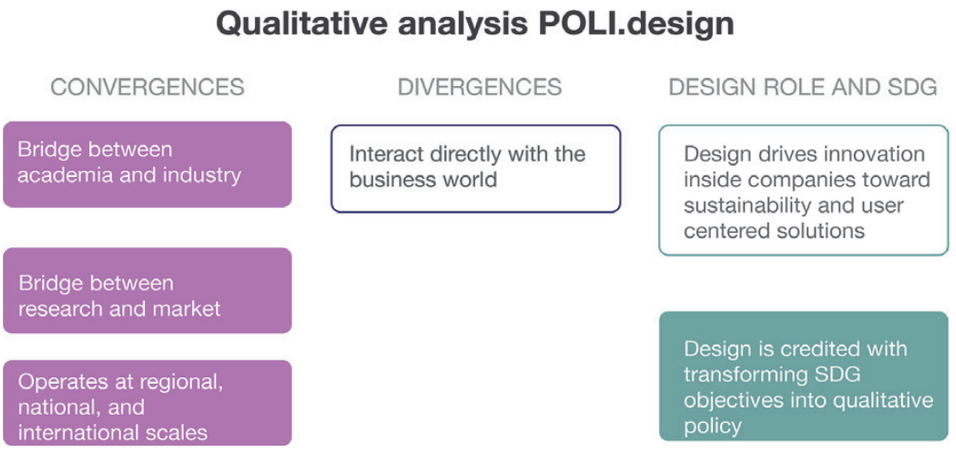


Fig. 10 | Qualitative analysis of POLI.design (credit: E. Chiara, 2025).

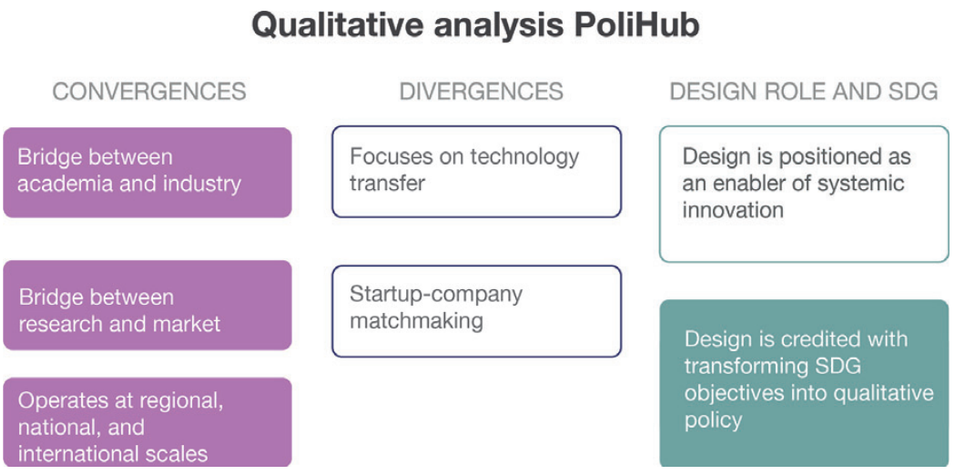


Fig. 11 | Qualitative analysis of PoliHub (credit: E. Chiara, 2025).

cently merged with Bocconi's incubator to form Tef Bridge (Figg. 3, 4); 3) Sustainability Innovation Centre (Uppsala, Sweden), an intermediary organisation delivering EU-funded incubation and acceleration programmes (Figg. 5, 6); and 4) USP Innovation Centre (São Paulo, Brazil), a university-based innovation centre focused on translating fundamental research into market-relevant innovation (Figg. 7, 8). Although these organisations occupy different positions within their respective innovation ecosystems, they all serve as bridges between academia and industry, research and market application, and supranational funding structures and local entrepreneurial initiatives.

At USP, this bridging role is expressed through the coordination of multidisciplinary university teams with public and private organisations, with particular emphasis on strengthening internal connections among project working groups and on translating university research into societal value. POLI.design, in turn, was deliberately established to enable the Politecnico di Milano to engage directly with the business world, bypassing intermediary bodies such as trade associations, and now operates at regional, national, and international scales.

PoliHub reinforces this ecosystemic intermediation through a B2B-oriented model focused on technology transfer, start-up-company matchmaking, and community building, particularly in support of research-based teams developing technologies with infrastructure-level impact. In the Stockholm-Uppsala context, the Uppsala SIC performs a similar bridging function within a multi-level, distributed governance structure shaped by EU partnership frameworks. In this structure, external lead partners influence programme content, while the centre is responsible for recruitment, evaluation, and operational delivery.

In the ecosystems analysed, design is credited with translating SDG into qualitative policy orientations aligned with organisational objectives

and operationalising them through R&D&I projects. Table 5 summarises the main strengths and pain points observed in the design-driven innovation initiatives developed at the analysed innovation centres.

Evaluation | Interviews served as both a validating and a complicating layer, neither simply confirming nor refuting the quantitative estimates, but instead sharpening conceptual distinctions between ecosystems and providing the interpretive texture that justifies the mixed-methods design. Although the KPI table presents ranges with apparent precision, interviewees consistently emphasised the uncertainty and interpretive limitations underlying these figures. For example, the POLI.design interviewee observed that design is a discipline with only a partially quantifiable nature, which makes KPIs difficult to define and measure across both processes and outcomes, with the latter primarily validated at the level of professional practice. This directly confirms the relevance of the framework's core methodological problem: indicators must be carefully designed to capture qualitative and relational dimensions alongside quantitative ones, rather than defaulting to proxies that flatten design's contribution into countable outputs.

The interviews also revealed that design's positioning within innovation ecosystems is far from uniform. Across the four interviews, design emerges along a spectrum: an explicit strategic capability at USP (Fig. 9) and POLI.design (Fig. 10); a systemic enabler embedded in venture-building logic at PoliHub (Fig. 11); and a structurally present but largely unnamed influence at Uppsala's Sustainability InnoCenter (Fig. 12). Stockholm-Uppsala operates through network coordination among relatively few, well-connected actors; Lombardy through a dense constellation of institutional anchors, including Politecnico, Bocconi, PoliHub, and POLI.design, with overlapping but sometimes disconnected mandates; and São Paulo through a volume-driven, grant-dependent model whose sustainability relies heavily on FAPESP's constitutionally guaranteed funding. This variation demonstrates genuine differences in institutional mandate (Fig. 13), governance architecture, and ecosystem scale, and suggests that a robust framework must be sensitive to both explicit design integration and the implicit, design-like practices that shape ecosystem programmes without carrying

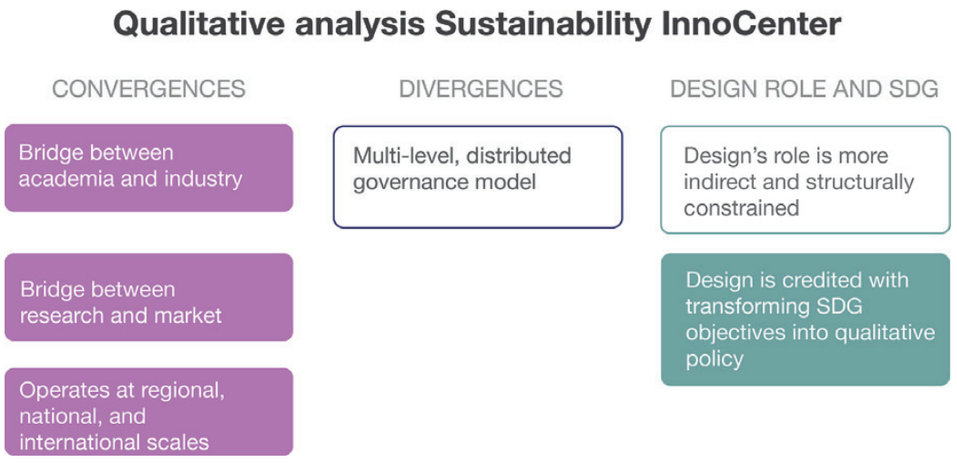


Fig. 12 | Qualitative analysis of Sustainability InnoCenter (credit: E. Chiara, 2025).

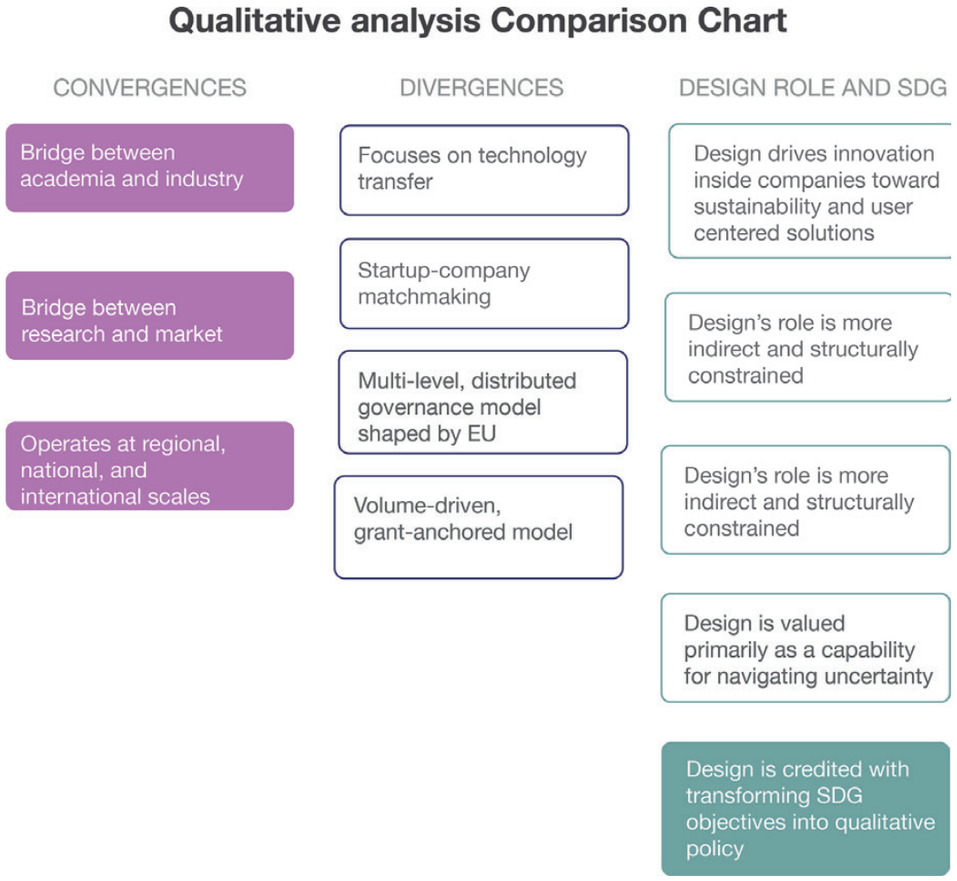


Fig. 13 | Qualitative analysis comparison chart (credit: E. Chiara, 2025).

the design label. The collaboration findings reinforce a pattern already identified theoretically in the SDG 17 analysis: effective partnership depends less on the existence of linkages than on the quality of their connections, and designing for collaboration means explicitly addressing these dynamics.

Research contributions, potential, and limitations | The deployment of AI-assisted measurement constitutes a methodologically distinctive yet epistemically cautious contribution of this study. The experimental evidence reviewed suggests that LLMs can support scalable synthesis across heterogeneous data sources at a scale and speed that would be prohibitively demanding using manual methods alone. However, the recurring findings of the LLM evaluation studies also delineate the limits of their responsible application: automated inference may reproduce existing measurement biases, underrepresent tacit and contextually embedded knowledge, and generate overconfident classifications in high-uncertainty domains.

The comparative analysis presented in this study reveals that design's growing contribution to innovation ecosystems is structurally evident across all three regional contexts examined, yet systematically absent from the measurement frameworks that govern innovation policy. The qualitative findings introduce a further complication, one that the quantitative data cannot fully capture and that the framework must evolve to address. Across the institutional contexts examined, design emerges not as a stable capability defined consistently across contexts, but as a spectrum ranging from explicit strategic leadership, where designers are recognised as navigators of productive uncertainty, to implicit structural influence, where design-adjacent thinking operates without institutional attribution.

This paradox reveals that the advancement of design-driven innovation is constrained by the lack of instruments adequate to render that capability legible, governable, and transferable across institutional scales. The six-dimensional KPI framework proposed here, grounded in the WIPO Global Innovation Index architecture and extended through design-specific indicators validated by cross-disciplinary expert consultation, represents a step towards closing this gap. By systematically operationalising dimensions of knowledge production, talent development, entrepreneurial translation, capital orientation, governance quality, and societal impact through measurable proxies, the framework enables a form of comparative analysis that does not flatten design's contextual richness into countable outputs, but rather distributes its assessment across relational, processual, and structural registers.

While this study is primarily framed by SDG 9 and SDG 17, the proposed framework also reveals synergies with other Sustainable Development Goals. Strong synergies emerge with SDG 4, particularly through the Design Education, Talent and Skills dimension, and with SDG 8, through the Entrepreneurship and Capital and Finance dimensions, which together highlight the role of design in talent formation, skills development, startup creation, university-to-market translation, and knowledge-intensive economic activity. Indirect effects may also extend to SDGs 10, 11, 12, and 13, insofar as design can support inclusion, accessibility, sustainable production logics, and more resilient sociotechnical systems. These benefits, however, coexist with important trade-offs: ecosystem strengthening may intensify resource concentration, exclude vulnerable actors, reproduce bias through AI-assisted classification, and encourage hyper-metricised interpretations of innovation processes.

Conclusion and future developments | Design can be positioned within innovation metrics as a constitutive dimension of ecosystem coherence, shaping the quality of partnerships, the intelligibility of R&D&I outputs to users and investors, the architecture of access to public funding, and the capacity of institutional actors to navigate productive uncertainty. The design of KPI frameworks and classification protocols is, in the terms adopted in this study, a design problem in the same sense as the design of physical artefacts or service experiences: they involve decisions about what to make visible, who is included, which trade-offs are made legible, and how systemic coherence is produced through the arrangement of constituent parts.

While the present analysis remains experimental and exploratory, serving primarily to test the analytical validity and interpretive potential of the proposed frameworks, the three ecosystems examined reveal distinct governance architectures. São Paulo embodies a volume-driven, grant-anchored model, combining structurally guaranteed funding stability with strong absolute innovation momentum; Lombardy is characterised by a dense constellation of institutional anchors, underpinned by world-class design education and industrial heritage; and Stockholm-Uppsala represents a network-coordinated model in which design appears to be most fully embedded within formal innovation policy, thereby supporting broader SDG alignment and greater ecosystem resilience. However, the most consequential limitation of the present study is also its most generative opening: none of the three regions studied has a dedicated design measurement infrastructure. Every estimate produced is derived from proxy indicators, constructed through methodological improvisation, and subject to uncertainty ranges that would not be acceptable in more mature measurement domains. This is not a failure of the research design; it is an accurate diagnosis of a field-level gap, the closure of which constitutes the primary justification for the research programme this study initiates. The present study offers a framework for beginning that work, carefully, comparatively, and with full acknowledgement that the most important findings remain to be produced.

Future work aims to translate these findings into an inter-institutional, designer-led programme focused on co-designed measurement infrastructure, cross-ecosystem capability exchange, and evidence-based policy development across innovation centres. Its ambition is to produce relevant guidelines for strengthening the role of design in innovation ecosystems, to establish the institutional conditions under which that role can be continuously examined, refined, and operationalised across diverse governance contexts, and to foster the creation of new artefacts by a research-through-design perspective. The alignment of this programme with SDG 9 and SDG 17 is not rhetorical: both goals set normative imperatives for resilient, inclusive innovation infrastructure and for the quality of multi-stakeholder partnerships, which can only be addressed through design and evaluated through measurement frameworks sophisticated enough to capture design's constitutive, rather than peripheral, contribution.

Acknowledgements

This paper reports the preliminary results of an ongoing international research initiative developed within the USP CEPID BRIDGE Centre, a FAPESP-funded programme running from 2024 to 2028 and focused on developing methodological frameworks for measuring the contribution of design to innovation ecosystems at the meso level. The study was conducted in collaboration with three academic institutions: USP (São Paulo, Brazil), Polimi (Lombardy, Italy), and Sustainability Innocenter (Uppsala, Sweden), which jointly contributed to the conceptual framing, methodological design, comparative empirical exploration, and interpretation of the research. The Authors also acknowledge the valuable contributions of the organisations involved in the qualitative stage of the study, namely Consorzio POLI.design, PoliHub, the Sustainability InnoCenter, and the USP Innovation Centre. Their participation provided important institutional insights into the governance, partnership structures, and design-driven dynamics of the ecosystems analysed, and was fundamental to the exploratory validation of the proposed framework. The research remains ongoing, and the present article should therefore be read as an initial experimental contribution within a broader inter-institutional effort. Its purpose is to assess and refine the analytical validity of the proposed research artefacts and to support future work on co-designed measurement infrastructure, cross-ecosystem learning, and evidence-based policy development.

Note

1) Details of the prompt used may be requested from the Authors by email at the addresses provided.

References

Akenroye T. O., Owens, J. D., Elbaz, J. and Durowoju O. A. (2020), "Dynamic capabilities for SME participation in public procurement", in *Business Process Management Journal*, vol. 26, issue 4, pp. 857-888. [Online] Available at: doi.org/10.1108/BPMJ-10-2019-0447 [Accessed 7 April 2026].

Barbero, S. and Ferrulli, E. (2023), "Transizione ecologica e digitale – Il Design Sistemico nei processi di innovazione aperta delle PMI | Ecological and digital transition – Systemic Design in SMEs open innovation processes", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 13, pp. 269-280. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/13232023 [Accessed 12 April 2026].

Beckman, S. L. (2025), "Designing the future – Ecosystem innovation and systems leadership in 2053", in *The Design Journal | An International Journal for All Apects of Design*, vol. 28, issue 1, pp. 176-179. [Online] Available at: doi.org/10.1080/14606925.2024.2440769 [Accessed 7 April 2026].

Belluzzi Mus, C., Caccamo, A., Fazi, R. and Maselli, V. (2021), "Socialità digitale e Covid-19 – Service Design per l'analisi del coinvolgimento emotivo nella città digitale | Digital sociability in Covid-19 era – Service Design for the analysis of emotional involvement in the digital city", in *Agathón | International Journal of Architecture Art and Design*, vol. 10, pp. 250-261. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/10232021 [Accessed 7 April 2026].

Blanco, E., Zari, M. P., Raskin, K. and Clergeau, P. (2021), "Urban Ecosystem-Level Biomimicry and Regenerative Design – Linking Ecosystem Functioning and Urban Built Environments", in *Sustainability*, vol. 13, issue 1, article 404, pp. 1-12. [Online] Available at: doi.org/10.3390/su1 3010404 [Accessed 7 April 2026].

Brown, T. and Katz, B. (2009), *Change by design – How design thinking transforms organisations and inspires innovation*, Harper Collins Publisher, New York.

Campagnaro, C., Ronsivalle, D., Di Prima, N., Curtabbi, G. and Passaro, R. (2025), "Fare e rifare – Opportunità e limiti della co-progettazione per gli spazi pubblici e di welfare | Doing and redoing – Opportunities and limits of co-design for public and welfare spaces", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 17, pp. 310-323. [Online] Available at: doi.org/10.69143/2464-9309/17212025 [Accessed 7 April 2026].

Cash, P., Daalhuizen, J. and Hekkert, P. (2023), "Evaluating the efficacy and effectiveness of design methods – A systematic review and assessment framework", in *Design Studies*, vol. 88, article 101204, pp. 1-31. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.destud.2023.101204 [Accessed 7 April 2026].

Costa, N., Patrício, L., Morelli, N. and Magee, C. L. (2018), "Bringing Service Design to manufacturing companies – Integrating PSS and Service Design approaches, in *Design Studies*, vol. 55, pp. 112-145. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.destud.2017.09.002 [Accessed 7 April 2026].

Deserti, A., and Rizzo, F. (2014), "Design and the Cultures of Enterprises", in *Design Issues*, vol. 30, pp. 36-56. [Online] Available at: doi.org/10.1162/DESI_a_00247 [Accessed 7 April 2026].

Desmet, P., Overbeeke, K. and Tax, S. (2001), "Designing Products with Added Emotional Value – Development and Application of an Approach for Research through Design", in *The Design Journal | An International Journal for All Aspects of Design*, vol. 4, issue 1, pp. 32-47. [Online] Available at: dx.doi.org/10.2752/146069201789378496 [Accessed 7 April 2026].

Eisele-Metzger, A, Lieberum, J.-L., Toews, M., Siemens, W., Heilmeyer, F., Haverjkamp, C., Boheringer, D. and Meerpohl, J. J. (2025), "Exploring the potential of Claude 2 for risk of bias assessment – Using a large language model to assess randomised controlled trials with RoB 2", in *Research Synthesis Methods*, vol. 16, issue 3, pp. 491-508. [Online] Available at: doi.org/10.1017/rsm.2025.12 [Accessed 7 April 2026].

Galindo-Rueda, F. and Millot, V. (2015), "Measuring Design and its Role in Innovation", in *OECD Science, Technology and Industry Working Papers*, vol. 2015/01, pp. 1-51 [Online] Available at: dx.doi.org/10.1787/5js7p6lj6zq6-en [Accessed 7 April 2026].

Gartlehner, G., Kahwati, L., Nussbaumer-Streit, B., Crotty, K., Hilcher, R., Kugley, S., Viswanathan, M., Thomas, I., Konet, A. and Booth, G. (2025), "From promise to practice – Challenges and pitfalls in the evaluation of large language models for data extraction in evidence synthesis", in *BMJ Evidence-Based Medicine*, vol. 30, issue 6, pp. 385-389. [Online] Available at: doi.org/10.1136/bmjebm-2024-113199 [Accessed 7 April 2026].

Gasparotto, S., Bosco, A., Lengua, M. and Baruzzi, P. (2021), "MEET – Un percorso espositivo interattivo tra co-design e valorizzazione del territorio | Meet – An interactive exhibition itinerary between co-design and enhancement of the territory", in *Agathón | International Journal of Architecture Art and Design*, vol. 10, pp. 242-249. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/10222021 [Accessed 7 April 2026].

Hyysalo, S., Savolainen, K., Pirinen, A., Mattelmäki, T., Hietanen, P. and Virta, M. (2023), "Design types in diversified city administration – The case City of Helsinki", in *The Design Journal | An International Journal for All Aspects of Design*, vol. 26, issue 3, pp. 380-398. [Online] Available at: doi.org/10.1080/14606925.2023.2181886 [Accessed 7 April 2026].

İlhan, E. C. and Özemir, F. P. (2025), "Screens – Devices of screen ecosystems and designers' perspectives", in *Design Studies*, vol. 100, article 101331, pp. 1-28. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.destud.2025.101331 [Accessed 7 April 2026].

Insuk, S., Boonpattharatthiti, K., Booncharoen, C., Chaipitak, P., Rashid, M., Veettil, S. K., Lai, N. M., Chaiyakunapruk, N. and Dhippayom, T. (2025), "How Well Do ChatGPT and Claude Perform in Study Selection for Systematic Review in Obstetrics", in *Journal of Medical Systems*, vol. 49, article 110, pp. 1-9. [Online] Available at: doi.org/10.1007/s10916-025-02246-4 [Accessed 7 April 2026].

Katz, B. M. (2015), *Make it New – A History of Silicon Valley Design*, MIT Press, Cambridge (MA).

Kaynak, E., Piri, I. S. and Das, O. (2025), "Revisiting the Basics of Life Cycle Assessment and Lifecycle Thinking", in *Sustainability*, vol. 17, issue 16, article 7444, pp. 1-17. [Online] Available at: doi.org/10.3390/su17167444 [Accessed 7 April 2026].

Mosely, G., Markauskaite, L., Lodge, J. M. and Wrigley, C. (2025), "The role of expertise in design facilitation practice – A systematic review", in *Design Studies*, vol. 100, article 101342, pp. 1-51. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.destud.2025.101342 [Accessed 7 April 2026].

Nahavandi, S. (2019), "Industry 5.0 – A Human-Centric Solution", in *Sustainability*, vol. 11, issue 16, article 4371, pp. 1-13. [Online] Available at: doi.org/10.3390/su11164371 [Accessed 7 April 2026].

Nava, C. and Melis, A. (2024), "IA generativa e complessità – Verso un nuovo paradigma nel design digitale rigenerativo | Generative IA and complexity – Towards a new paradigm in regenerative digital design", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 16, pp. 40-49. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/1632024 [Accessed 12 April 2026].

Norman, D. A. and Verganti, R. (2014), "Incremental and Radical Innovation – Design Research vs. Technology and Meaning Change", in *Design Issues*, vol. 30, issue 1, pp. 78-96. [Online] Available at: doi.org/10.1162/DESI_a_00250 [Accessed 7 April 2026].

Osello, A. Ugliotti, F. M., Rimella, N. and Loddo, F. (2024), "Modelli digitali e linguaggio naturale – Nuove prospettive per interpretare la complessità | Digital models and natural language – New perspectives for interpreting complexity", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 16, pp. 212-219. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/16182024 [Accessed 7 April 2026].

Paay, J., Kuys, B. and Taffe, S. (2021), "Innovating product design through university-industry collaboration – Co-designing a bushfire rated skylight", in *Design Studies*, vol. 76, article 101031, pp. 1-24. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.destud.2021.101031 [Accessed 7 April 2026].

Prochner, I. and Godin, D. (2022), "Quality in research through design projects – Recommendations for evaluation and enhancement", in *Design Studies*, vol. 78, article 101061, pp. 1-26. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.destud.2021.101061 [Accessed 7 April 2026].

Sposito, C. and Scalisi, F. (2024), "Riflessioni e traiettorie di ricerca interdisciplinari sulla transizione energetica | Reflections and trajectories for interdisciplinary research on the energetic transition", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 15, pp. 3-17. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/1502024 [Accessed 7 April 2026].

Startup Genome (2025), *The Global Startup Ecosystem Report 2025*. [Online] Available at: startupgenome.com/report/gser2025/introduction [Accessed 7 April 2026].

Tsujimoto, M., Kajikawaa, Y., Tomitab, J. and Matsumotoc, Y. (2018), "A review of the ecosystem concept – Towards coherent ecosystem design", in *Technological Forecasting & Social Change*, vol. 136, pp. 49-58. [Online] Available at: dx.doi org/10.1016/j.techfore.2017.06.032 [Accessed 7 April 2026].

UN – United Nations General Assembly (2015), *Transforming our World – The 2030 Agenda for Sustainable Development*, document A/RES/70/1. [Online] Available at: sdgs.un.org/2030agenda [Accessed 7 April 2026].

Verganti, R. (2008), "Design, Meanings, and Radical Innovation – A Metamodel and a Research Agenda", in *Journal of Product Innovation Management*, vol. 25, issue 5, pp. 436-456. [Online] Available at: doi.org/10.1111/j.154 0-5885.2008.00313.x [Accessed 7 April 2026].

Wikander, P., Collins, D. and Evans, J. (2025), "Researching collaborative housing through design – A case study of co-design workshops involving low-income recent immigrants in Canada", in *Design Studies*, vol. 99, article 101326, pp. 1-27. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.destud.2025.101326 [Accessed 7 April 2026].

WIPO – World Intellectual Property Organization (2024), *Global Innovation Index 2024 – Executive Version*, World Intellectual Property Organization, Geneva. [Online] Available at: doi.org/10.34667/tind.50186 [Accessed 7 April 2026].

Wrigley, C., Mosely, G. and Tomitsch, M. (2018), "Design Thinking Education – A Comparison of Massive Open Online Courses", in *She Ji | The Journal of Design, Economics, and Innovation*, vol. 4, issue 3, pp. 275-292. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.sheji.2018.06.002 [Accessed 7 April 2026].

Xu, X., Lu, Y., Vogel-Heuser, B. and Wang, L. (2021), "Industry 4.0 and Industry 5.0 – Inception, conception and perception", *in Journal of Manufacturing Systems*, vol. 61, pp. 530-535. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.jmsy.2021.10.006 [Accessed 7 April 2026].

Yisha, Z., Zou, P., Li, S., Zhang, L., Guo, L., Gu, A., Liu, G., Liu, T. and Wang, X. (2026), "Assessing data extraction in randomised clinical trials with large language models", in *BMC Medical Research Methodology*, vol. 26, article 33, pp. 1-10. [Online] Available at: doi.org/10.1186/s12874-025-02729-5 [Accessed 7 April 2026].

Zannoni, M., Succini, L., Rosato, L. and Pasini, V. (2024), "Transitional industrial designer – La responsabilità di progettisti e imprese per una transizione sostenibile | Transitional industrial designer – The responsibility of designers and companies for a sustainable transition", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 15, pp. 332-343. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/15282024 [Accessed 12 April 2026].

AGATHÓN – International Journal of Architecture, Art and Design | n. 19 | 2026 | pp. 400-415
ISSN print: 2464-9309 – ISSN online: 2532-683X | doi.org/10.69143/2464-9309/19232026

Article Info

Received 13 March 2026
Revised 29 April 2026
Accepted 30 April 2026
Published 30 June 2026

DESIGN PER IL TURISMO RIGENERATIVO
Musei, alleanze territoriali e rafforzamento delle competenze

DESIGN FOR REGENERATIVE TOURISM
Museums, territorial alliances, and capacity building

Emanuela Bonini Lessing, Alessandra Bosco, Mario Ciaramitaro, Goran Pavlov

Abstract

Il paper presenta una ricerca nel campo del Design per i Territori, nell'ambito del progetto europeo Med4Regen, che posiziona musei e Istituzioni culturali come nodi centrali degli ecosistemi del turismo rigenerativo. A differenza del turismo sostenibile, focalizzato sulla mitigazione dell'impatto, quello rigenerativo persegue la vitalità dei luoghi e delle comunità attraverso un paradigma ecosistemico fondato su relazioni, coevoluzione e trasformazione dei modelli mentali. La letteratura sul design territoriale ha finora privilegiato contesti rurali e marginali: qui vengono affrontati contesti ad alta pressione turistica, configurando il designer come mediatore e attivatore tra gli stakeholder e definendo, nelle conclusioni, il suo ruolo riflessivo come centrale per l'azione rigenerativa.

This paper presents research in the field of Design for Territories, developed within the European Med4Regen project, which positions museums and cultural institutions as central nodes within regenerative tourism ecosystems. Unlike sustainable tourism, which is primarily concerned with mitigating impact, regenerative tourism pursues the vitality of places and communities through an ecosystemic paradigm based on relationships, co-evolution, and the transformation of mindsets. To date, the literature on territorial design has mainly addressed rural and marginal contexts: this contribution focuses instead on settings under high tourism pressure, framing the designer as a mediator and activator among stakeholders and, in the conclusions, defining the designer's reflexive role as central to regenerative action.

Keywords

turismo rigenerativo, design per i territori, istituzioni culturali, progetto partecipativo territoriale, overtourism

regenerative tourism, design for territories, cultural institutions, territorial participatory design, overtourism

Emanuela Bonini Lessing, PhD, is an Associate Professor of Design at the Università 'Iuav' di Venezia (Italy). She has been awarded international research fellowships and has been a Visiting Professor and Lecturer at Universities in Europe and Latin America. Her research focuses on environmental graphic design, communication design theory, and design for cultural heritage enhancement. E-mail: ebonini@iuav.it

Alessandra Bosco, Architect and PhD, is an Associate Professor of Design at the Università 'Iuav' di Venezia (Italy). Her research focuses on design education, design for cultural heritage enhancement, and exhibit design. E-mail: amlbosco@iuav.it

Mario Ciaramitaro, PhD, is currently a Research Fellow and has collaborated with Università 'Iuav' di Venezia (Italy) since 2011 as a tutor in visual arts and design courses, where he works on creating scenarios for cultural development. E-mail: mciaramitaro@iuav.it

Goran Pavlov, who graduated from the Faculty of Electrical Engineering, Mechanical Engineering and Naval Architecture (Croatia), is a development project manager with experience in private and non-governmental organisations in the fields of agriculture, electronics, and information technology. His professional focus is on innovation and the implementation of best practices, as well as cooperation between SMEs and research institutions / universities. E-mail: goran.pavlov@iricentar.hr



Robert C. Davis (2022), nella nuova edizione italiana del saggio Il Giocattolo del Mondo – Venezia nell'Epoca dell'Iperturismo, intitola l'ultimo capitolo con un detto veneziano: 'chi ciapa i schei xe contento, i altri no' ('chi prende i soldi è contento ma tutti gli altri no'). La frase non è una battuta: chi guadagna dal turismo non si occupa di nient'altro che del profitto. Quando una città smette di essere un luogo abitato per diventare una macchina di estrazione del valore turistico il beneficio si concentra su pochi, mentre i disagi e i costi, tra cui la scomparsa dei servizi, la perdita di identità e l'aumento del costo degli affitti, si distribuiscono su tutto il territorio. Chi non riesce a convivere e a capitalizzare questa monocultura abbandona la città, trasferendosi o arrendendosi psicologicamente a vivere in una scenografia: in trent'anni la Città di Venezia ha perso oltre un terzo dei suoi residenti e il centro storico potrebbe essere completamente spopolato entro il 2054 (Davis, 2022).

La città che da secoli ha costruito la sua identità sull'utopia della propria esistenza sull'acqua, sull'ingegno e sull'unicità dei suoi abitanti (Calvino, 1995), si trova a perdere la linfa vitale perché il turismo si impone come una monocultura che consuma le condizioni che la rendono possibile (Zanardi, 2020). La città, diventata per il visitatore un esempio di bene di consumo da fotografare e attraversare rapidamente, cercando di coglierne e possederne l'immaginario, risulta così un punto di riferimento negativo per diversi centri urbani, in cui fenomeni di turismo di massa corrompono e depauperano il tessuto sociale, generando al contempo nuovi indotti economici. Dall'introduzione delle piattaforme digitali per affitti di brevissima durata sono trascorsi circa tredici anni; le trasformazioni urbane che ne sono derivate in numerose città, ampiamente discusse in letteratura, trovano nel caso di Venezia (Bertocchi et alii, 2020) uno degli esempi più citati come paradigma delle dinamiche di gentrificazione e di progressivo svuotamento residenziale dei centri storici (Cocola-Gant, 2018).

Meta di turisti da tutto il mondo, Venezia è raggiunta con percorsi che attraversano il continente europeo e l'Italia e via mare lungo le rotte crocieristiche (Fig. 1) del sistema turistico del Mediterraneo, destinazione molto ambita, nonostante rappresenti un ecosistema in difficoltà a causa del cambiamento climatico, dei danni ambientali e delle crescenti pressioni sociali. Per preservarne l'attrattività e la resilienza, oltre che monitorare gli impatti delle attività antropiche mediante strumenti quantitativi ormai standard internazionali consolidati (Sposito and De Giovanni, 2023), risultano necessarie azioni di sviluppo per nuovi modelli di turismo che includano, fra le priorità, la sostenibilità e la capacità rigenerativa degli interventi.

All'interno di questo contesto, alcuni ricercatori dell'Università 'Iuav' di Venezia (Silvia Maria Carolo e Mario Ciaramitaro) con il supporto del EU project consultant Paolo Carlucci, hanno sviluppato nel 2024 una proposta di progetto per sperimentare azioni in grado di invertire la tendenza in atto, con l'obiettivo di proporre un diverso modello di turismo culturale responsabile e consapevole.

L'ipotesi di ricerca è che tale risultato possa essere raggiunto mettendo in rete le associazioni locali e le Istituzioni culturali in modo da favorire un'alleanza tra cittadini e visitatori, affrontando alcune grandi sfide odierne (Fig. 2): contrastare il turismo di massa e le narrative turistiche dominanti, offrire un modello alternativo attraverso il ruolo attivo dei centri culturali urbani e di quelli nelle aree periferiche e valorizzare il Patrimonio scientifico e naturale attraverso logiche di sostenibilità ambientale e sociale.

Il progetto, denominato Med4Regen, ha ottenuto un finanziamento nell'ambito della cooperazione territoriale europea Euro-MED e muove dalla consapevolezza che le Istituzioni culturali locali dispongono già di un Patrimonio consolidato di relazioni con le comunità di riferimento e che tale capitale relazionale può sostenere la trasformazione di musei[1], centri culturali e Patrimonio materiale e immateriale locale in risorse strategiche per un turismo più sostenibile e rigenerativo.

Per conseguire questo obiettivo il progetto si articola in quattro fasi principali: 1) analisi del contesto e delle modalità con cui il turismo è percepito e vissuto alla scala locale; 2) formazione e rafforzamento delle competenze per le Istituzioni culturali, così da consentire loro di acquisire strumenti e metodologie di co-progettazione; 3) implementazione di azioni pilota finalizzate alla costruzione di un'offerta turistica rigenerativa; 4) diffusione dei risultati a decisori pubblici e responsabili delle politiche.

L'obiettivo è dunque superare il paradigma della sostenibilità, intesa prevalentemente in senso conservativo, per approdare a un turismo rigenerativo in grado di coniugare le urgenze ambientali con la sostenibilità economica e sociale, fondata sull'inclusione, sui diritti e sul benessere, orientando lo sviluppo verso maggiore equità. In questa prospettiva, coerente con gli obiettivi dell'Agenda 2030 (UN, 2015), l'armonizzazione tra fattori economici, sociali e ambientali può generare impatti positivi per i luoghi e le comunità ospitanti (Fig. 3).

Med4Regen propone una riflessione sul turismo rigenerativo grazie a un partenariato diversificato con competenze specifiche e sedi in città legate al turismo dell'area del Mediterraneo: Regione del Veneto – Direzione Beni, Attività Culturali e Sport (Italia), Università 'Iuav' di Venezia (Italia), Promálaga (Spagna), Regione dell'Epiro (Grecia), Facoltà di Architettura di Sarajevo (Bosnia-Erzegovina), Open Tourisme Lab di Nîmes (Francia), Ente del Turismo Regione di Spalato-Dalmata (Croazia) e Museo dell'Architettura di Lubiana (Slovenia).

Alla luce delle premesse fin qui delineate il contributo si pone un triplice obiettivo: in primo luogo propone un inquadramento teorico che mette in dialogo il Design per i Territori con il paradigma emergente del turismo rigenerativo, colmando un vuoto nella letteratura che ha privilegiato contesti marginali e rurali, trascurando le dinamiche urbane ad alta pressione turistica; in secondo luogo documenta e analizza criticamente il framework 'iperlocale' e il processo partecipativo sviluppati nella prima fase del progetto europeo Med4Regen, restituendo una metodologia operativa per la transizione rigenerativa del turismo in contesti mediterranei, fondata su strumenti di co-diagnosi e co-progettazione; in terzo luogo mira a fornire un modello di indagine per ricercatori, progettisti e decisori politici che intendano proporre le Istituzioni culturali come presidi di identità e coesione territoriale, infrastrutture relazionali (Battaglini, 2024) tra comunità e visitatori.

Inquadramento teorico e metodologico | Il progetto si fonda su due nuclei fondamentali: il turismo rigenerativo e il Design per i Territori, ambiti disciplinari che orientano l'impostazione del progetto verso un riequilibrio della relazione tra visitatori, residenti e contesto urbano, assumendo come imprescindibile la correlazione tra welfare urbano e turismo (Ricci, Poli and Marino, 2025).

Per operare nell'ambito del turismo rigenerativo le discipline del design devono assumere nuovi obiettivi e responsabilità; attraverso processi di co-design progettisti e attori locali agiscono come facilitatori, promotori e attivatori di azioni concrete nelle relazioni con comunità e territori. Spesso definito erroneamente come un'evoluzione del turismo sostenibile (Bellato and Pollock, 2025) che mira alla mitigazione dell'impatto ambientale, anche attraverso la proposta e il sostegno di pratiche di turismo lento (Cimadomo, Lecardane and Torregrossa, 2025), il turismo rigenerativo mira a rafforzare la vitalità dei luoghi e delle comunità, ponendo l'accento su un cambiamento dei modelli mentali, che supera il punto di vista individuale a favore di una prospettiva collettiva (Mang and Reed, 2012; Dredge, 2022).

Adottare tale approccio implica il superamento di pratiche orientate esclusivamente alla gestione e al monitoraggio degli impatti, il che favorisce l'elaborazione di processi trasformativi, capaci di produrre valore sociale, ambientale e culturale, oltre che economico. Come rilevato da Camrass (2020) la rigenerazione non rappresenta una condizione finale, ma un processo continuo di adattamento e apprendimento in cui il design, sostenendo e promuovendo processi partecipativi per la costruzione di capacità e la condivisione della conoscenza, diventa uno strumento di evoluzione culturale e di apprendimento sociale. Adottando un approccio iperlocale il designer co-progetta con i residenti, mettendo al centro conoscenze e risorse locali, presupposto per sviluppare soluzioni di turismo rigenerativo radicate sui contesti e coerenti con essi.

In tale ottica la presente ricerca si riferisce al campo del Design per i Territori (Parente and Sedini, 2017; Bosco, Bonini Lessing and Parente, 2025) finalizzato alla valorizzazione di un sito specifico, abbracciando gli obiettivi e risignificando metodi e strumenti che, riformulati secondo le esigenze strategiche della progettazione europea, supportano i partner in un processo di rafforzamento delle competenze che orienta e promuove pratiche di turismo rigenerativo adattabili in differenti contesti.

In Med4Regen gli strumenti del design per i territori, focalizzati in particolare sulla valorizzazione di aree marginali, rurali e interne (zone a bassa densità colpite dallo spopolamento) e su progetti orientati al turismo sostenibile, vengono verificati e riconfigurati per essere applicati in contesti urbani ed extraurbani soggetti a overtourism, già caratterizzati dalla presenza di spazi culturali attrattivi. Musei e centri culturali sono riposizionati dalla ricerca come hub culturali capaci di aggregare e orientare reti di associazioni e attori locali che mettono in relazione comunità residenti e turisti e costituiscono il motore dello sviluppo di attività di turismo rigenerativo.

Questo processo può costituire un modello iterabile nel tempo e declinabile su diversi territori in cui reti di interlocutori locali responsabili e consapevoli, centri culturali, comunità di residenti e visitatori, adottando gli strumenti dedicati messi a disposizione dal processo di rafforzamento delle competenze locali, possono a loro volta innescare azioni rigenerative, moltiplicando gli impatti della ricerca.

Lo stato dell'arte nel dibattito internazionale | Il campo di studio del Design per i Territori si è con-



Fig. 1 | Cruise ship crossing the Giudecca Canal, 2009 (source: commons.wikimedia.org).

solidato a partire dalla fine degli anni Novanta, evolvendo progressivamente da una concezione del territorio come semplice contesto del progetto a quella di oggetto e sistema relazionale di intervento.

Parente e Sedini (2017) ricostruiscono questa traiettoria distinguendo tre approcci – design nel, del e per il territorio – evidenziando come quest'ultimo integri e ampli i precedenti, assumendo il capitale territoriale come fulcro di strategie progettuali multiattoriali. Tamborrini (2019) estende questa articolazione proponendo una progettazione 'con' il territorio, in cui il luogo diviene parte integrante del processo e l'Università opera come nodo relazionale tra progettisti e imprese per l'innovazione sostenibile. In questa prospettiva Villari (2012, 2024) propone un approccio centrato sulla comunità che articola il ruolo delle comunità locali come beneficiarie, co-progettiste e attivatrici d'innovazione, delineando scenari – design con, per e delle comunità (Villari, 2021) – che restituiscono la complessità dei processi partecipativi a scala locale. Al ruolo della comunità nel Design per i Territori fa riferimento ad esempio Brignoni et alii (2023) che, sviluppando una tassonomia per mappare interventi guidati dal design di rigenerazione in piccole città fortificate e aree interne, utilizzano come variabili interdipendenti la dimensione temporale e il grado di coinvolgimento della comunità.

Sul piano culturale Manzini (2016) argomenta la necessità di superare i limiti del soluzionismo e del partecipazionismo che impoveriscono il design emergente, proponendo un approccio dialogico in cui i progettisti contribuiscono con visioni, valori e criteri di qualità, non limitandosi a facilitare processi. Cruz, Rocha e Rodrigues (2025) sottolineano la centralità della dimensione territoriale nelle indagini progettuali e confermano il valore dell'interdisciplinarità nella ricerca che mette in relazione design e contesto, identificandone i metodi più ricorrenti.

La dimensione territoriale è al centro delle recenti definizioni di turismo rigenerativo che mira a migliorare attivamente la salute e la vitalità dei sistemi socio-ecologici di cui il turismo è parte integrante (Bellato and Pollock, 2025; Dredge, 2022). In questa prospettiva il turismo non si limita a 'non danneggiare' l'ambiente o le comunità locali, ma diventa uno strumento di co-evoluzione tra persone, luoghi e natura, contribuendo alla prosperità condivisa e alla resilienza dei territori (Mang and Reed, 2012). Secondo Bellato e Pollock (2025) il turismo rigenerativo si fonda su un paradigma ecologico e sistemico, che riconosce il mondo come un insieme di sistemi viventi interconnessi.

Questa visione implica che ogni intervento turistico debba contribuire alla rigenerazione dei processi vitali locali anziché estrarne valore. Il turismo viene pertanto concepito come un processo di reciproca cura e rigenerazione tra visitatori, comunità e ambienti attraverso tre elementi cardine: una prospettiva fondata sui sistemi viventi che considera i luoghi come organismi complessi e interdipendenti; la centralità del luogo e delle comunità attraverso pratiche che valorizzano saperi locali, favorendo un legame autentico con il territorio; il superamento di una visione meccanicistica e lineare della crescita economica a favore di una visione ecosistemica basata su relazioni, benessere e co-evoluzione (Bellato and Pollock, 2025; Dredge, 2022; Mang and Reed, 2012). Dredge (2022) descrive questo

cambiamento come un'evoluzione da un turismo gestito secondo logiche di pianificazione lineare e di gestione scientifica a un turismo inteso come un sistema adattivo complesso, in cui il valore nasce dalle connessioni e dalle interazioni tra attori e ambienti. Le radici della letteratura che più lega la progettazione ai luoghi in sintonia con un approccio rigenerativo possono essere rintracciate nel lavoro di Norman W. Sheehan (2011) sul Respectful Design fondato sui saperi indigeni. Sheehan propone una visione del design come intersezione attiva tra materiali, prodotti, interazioni sociali e ambienti, radicata nella consapevolezza che i sistemi naturali e le comunità umane sono entità (vive), interdipendenti e dotate di una propria intelligenza relazionale.

Pur muovendosi su piani disciplinari diversi, tre filoni condividono un'attenzione comune per la dimensione situata (Parente, Lupo and Sedini, 2018) del progetto. Ezio Manzini (2010) definisce l'innovazione sociale con quattro attributi chiave – piccola, locale, aperta e connessa – che indicano sistemi progettuali distribuiti localmente e mostrano come il Design incida sulle strutture della vita quotidiana (Manzini, 2018). Fagnoni (2018) dapprima ha esplorato il legame circolare tra design e territorio, identificando nelle tracce (memoria, cultura e immaginario) il materiale generativo per prodotti, servizi e azioni, articolando lo sviluppo in cultura, persone ed economia, successivamente ha introdotto il concetto di 'design in allerta', identificando micro-azioni iperlocali orientate alla sopravvivenza e alla cura (Fagnoni, 2022).

Tuttavia la letteratura esaminata, sia quella interna al Design per i Territori sia quella dei filoni tangenziali, si concentra prevalentemente su contesti marginali, rurali o a bassa densità abitativa come campo di applicazione, oppure su prospettive centrate sulla mitigazione degli impatti, sull'ottimizzazione dell'esperienza individuale o sulla costruzione di identità visive. Si tratta di un tratto ricorrente, quest'ultimo, riconosciuto anche nella letteratura sul 'place branding', in cui Kavaratzis, Warnaby e Ashworth (2015) hanno sollecitato il superamento di approcci puramente comunicativi a favore di uno sviluppo integrale del brand territoriale, fondato su cultura, identità e coinvolgimento degli stakeholder. Nel dibattito più recente ad esempio il progetto dell'identità territoriale è stato indagato anche come dispositivo comunicativo scalabile, capace di organizzare e rendere leggibile la complessità dei luoghi attraverso sistemi visivi e narrativi coerenti (Trocchianesi, 2012; Casarotto and Oddone, 2024). Le linee di ricerca finora richiamate privilegiano la valorizzazione di aree marginali e a bassa densità, il rafforzamento delle identità visive territoriali e l'innovazione dell'esperienza individuale di visita, lasciando il dibattito sui contesti urbani ad alta pressione turistica frammentario e prevalentemente affidato a discipline esterne al Design per i Territori e in particolare alla pianificazione urbanistica e agli studi sulla governance turistica dei territori; su queste basi il contributo si articola in tre piani complementari e verificabili.

Sul piano contestuale la ricerca sposta intenzionalmente il campo di applicazione del Design per i Territori dai contesti rurali e marginali (Brignoni et alii, 2023; Fagnoni, 2018, 2022; Pereno and Barbero, 2020), ai contesti urbani mediterranei caratterizzati da sovraccarico turistico e tensioni strutturali tra residenti e visitatori.

Sul piano metodologico il contributo non adotta strumenti generalisti di co-design né una matrice puramente analitica di valutazione dei sistemi turistici locali, ma propone un modello integrato a tre componenti: il quadro metodologico iperlocale, derivato dall'estensione del modello circolare di Fagnoni (2018) e articolato in sei dimensioni di lettura del territorio – Patrimonio, Tracce, Narrazioni, Azioni, Eventi, Immaginario – incrociate con quattro modelli di azione rigenerativa – Riparare, Riconnettere, Riattivare, Redistribuire; uno strumento di autovalutazione a dieci dimensioni, che consente a ricercatori, progettisti e attori locali di verificare il grado di integrazione dell'approccio in qualsiasi progetto territoriale; un protocollo di focus group strutturati e comparabili condiviso tra otto partner in sette Paesi mediterranei, che restituisce dati qualitativi confrontabili e fonda la dimensione transnazionale della ricerca. La combinazione di questi fattori distingue il contributo sia dagli approcci centrati sull'uso di singoli strumenti partecipativi sia dall'adozione di metodologie quantitative di monitoraggio degli impatti, costituendone il principale punto di originalità.

Sul piano culturale il posizionamento di musei e Istituzioni culturali come infrastrutture relazionali (Battaglini, 2024) tra comunità residenti e visitatori sposta il dibattito museale oltre le polarità tradizionali della valorizzazione del Patrimonio, dell'innovazione dell'esperienza di visita e della gestione integrata dei dati di fruizione (Rosmino, 2024; Villani, Romagna and Oddi, 2024), assegnando alle Istituzioni culturali una funzione di mediazione tra città abitata e città visitata; tale riposizionamento è verificato empiricamente attraverso la selezione di nove casi studio raccolti dalla partnership e i due cicli di focus group e si configura come struttura operativa replicabile in altri contesti mediterranei.

Obiettivi della prima fase di Med4Regen | Il Work Package 1 di Med4Regen ha perseguito tre obiettivi interconnessi; sul piano teorico-metodologico ha elaborato un framework condiviso, definito 'approccio iperlocale', per leggere i territori mediterranei della partnership in chiave rigenerativa, superando la pianificazione turistica standardizzata e ancorando il turismo rigenerativo a dinamiche microterritoriali: patrimoni materiali e immateriali, reti di prossimità, memorie collettive e immaginari locali.

In secondo luogo la ricerca ha raccolto dati qualitativi strutturati sulle percezioni, i bisogni e le tensioni espresse da organizzazioni culturali (musei, centri culturali e fondazioni) e comunità locali (residenti, associazioni, PMI e operatori turistici), costruendo una base di conoscenza transnazionale utile a orientare le azioni pilota successive e a individuare le leve concrete per la transizione rigenerativa. In modo trasversale è stata sperimentata l'efficacia di strumenti di design partecipativo – focus group strutturati, matrici di valutazione e mappatura sistemica – come dispositivi di ascolto, co-diagnosi e co-progettazione tra attori istituzionali, culturali e comunitari in contesti mediterranei eterogenei.

Approccio iperlocale e ricerca per azioni rigenerative | L'impianto metodologico dell'attività si è fondato su due nuclei complementari: l'elaborazione del framework iperlocale e la progettazione di un processo di indagine partecipativa articolato in focus group. Il framework iperlocale, sviluppato dalla 'Università Iuav di Venezia' (PP2), nasce dalla convergenza tra le pratiche del Design per i Territori e i principi del turismo rigenerativo.

Il quadro metodologico basato sull'approccio circolare di Fagnoni (2018) supera l'accezione meramente geografica del termine 'locale' per introdurre una prospettiva relazionale, qualitativa e temporale; esso si struttura intorno a sei dimensioni analitiche (Tab.1) – Patrimonio, Tracce, Narrazioni, Azioni, Eventi, Immaginario – che costituiscono altrettante lenti attraverso le quali indagare le specificità di un territorio, le sue stratificazioni storiche e culturali e le possibilità di trasformazione che ne derivano. A queste dimensioni si affiancano quattro modelli di azione rigenerativa – Riparare, Riconnettere, Riattivare, Redistribuire – identificati dal partner Open Tourisme Lab (OTL; Fig. 4), che orientano la traduzione dei dati di ricerca in interventi progettuali concreti.



Fig. 2 | The five thematic challenges identified by the project (credit: Med4Regen 'Iuav' team, 2025).

Il framework iperlocale è stato concepito fin dall'origine come metodologia trasferibile: rappresenta infatti un primo passaggio per il rafforzamento delle competenze, utile a interrogare associazioni e Istituzioni sulle modalità con cui interpretano il territorio e a promuovere, attraverso nuove lenti, un diverso orientamento progettuale. Il principio fondamentale è che le conoscenze tacite, la memoria collettiva e gli immaginari di un luogo non possono diventare risorse private, ma devono sempre essere restituiti e connessi alle comunità che li custodiscono. A tal proposito è stato definito uno strumento di autovalutazione a dieci dimensioni – Patrimonio, Tracce, Narrazioni, Azioni, Eventi, Immaginario, Riparare, Riconnettere, Riattivare, Redistribuire – che offre una modalità di autovalutazione agile e replicabile, utilizzabile da ricercatori, progettisti e attori locali per verificare il grado di integrazione dell'approccio iperlocale e dei principi di rigenerazione in qualsiasi progetto territoriale (Tab. 2).

Parallelamente lo 'Iuav' e il partner di ricerca OTL hanno predisposto una metodologia strutturata per i focus group, concepita come strumento di raccolta di dati qualitativi e di attivazione partecipativa (Muratovski, 2022). La metodologia, proposta agli altri partner della ricerca e successivamente affinata sulla base dei contributi condivisi, prevede l'impiego di strumenti ispirati al Design Thinking, di mappature sistemiche degli stakeholder, di matrici per la valutazione della prontezza rigenerativa, di esercizi di definizione collettiva delle priorità e di schede progetto per micro-sperimentazioni. Tali strumenti sono stati inseriti in sessioni di lavoro della durata di due o tre ore, con gruppi composti da quattro a otto partecipanti, facilitati da un conduttore e da un verbalizzatore. Tutti i partner hanno realizzato, entro le tempistiche definite dal progetto, i rispettivi focus group sulla base di un modello condiviso per l'azione sul campo e per la restituzione dei risultati, garantendo la comparabilità analitica degli esiti pur nel rispetto delle specificità locali.

L'attività si è sviluppata attraverso un processo articolato in quattro fasi, tra loro connesse sul piano logico e cronologico; la prima fase, dedicata all'analisi dei casi studio individuati da ciascun partner (Figg. 5, 6), ha evidenziato la prevalenza di iniziative orientate alla trasformazione delle narrazioni turistiche e alla valorizzazione del Patrimonio paesaggistico, con netta predominanza di progetti di lungo periodo e con le comunità locali quali principali beneficiarie.

Nove casi raccolti dalla partnership Med4Regen con contesti eterogenei e scale differenziate coprono tutto lo spettro dei trentacinque casi studio raccolti: dall'oggetto-dispositivo dell'Alghero Playful Itinerary al quartiere (Museum in the Community del MAO a Fužine, Urban Pop-up nel Museums Quarter di Sarajevo), dalla comunità rurale (Museo Papagiannis in Ioannina, Archivio Atena in Campania) al sistema portuale-metropolitano del Reclaiming the Waterfront a Málaga, fino alla rete territoriale e transnazionale di Derrière Le Hublot lungo il GR65, dell'AA Nanotourism Summer School e di Tocatì, festival di giochi storici riconosciuto come Buona Pratica UNESCO.

Gli attori-promotori che coprono l'intero spettro istituzionale con Amministrazioni locali, Musei, Autorità infrastrutturali, Scuole di architettura, Associazioni non profit e Cooperative di comunità sono tutti orientati alle comunità residenti e i loro obiettivi rigenerativi si polarizzano lungo le sfide del progetto: il contrasto alle narrazioni turistiche dominanti procede attraverso la riscrittura sensibile dei luoghi e la valorizzazione della memoria (Alghero, Nanotourism, Derrière Le Hublot, Archivio Atena); l'attivazione dei centri culturali urbani e periurbani trasforma i musei in infrastrutture relazionali di prossimità (MAO, Sarajevo, Papagiannis); la risposta all'overtourism ridistribuisce la pressione attraverso la riconversione di fronti urbani (Málaga); la salvaguardia del Patrimonio immateriale costruisce reti internazionali di comunità di pratica (Tocatì).

Le metodologie convergono sull'approccio partecipativo e iperlocale, declinato in dispositivi distinti (gamification, co-design dello spazio pubblico, prototipazione site-specific, pop-up modulari, commissione artistica, archivi digitali partecipati, festival) e generano esiti che spaziano da prodotti tangibili a infrastrutture relazionali consolidate fino a riconoscimenti internazionali. I punti di forza ricorrenti riguardano la qualità della relazione fra Istituzioni e comunità, la riusabilità dei dispositivi e la durata di lungo periodo; le barriere riguardano la frammentazione della governance, la rigidità dei quadri normativi e la difficoltà di attivazione dei residenti; fra i limiti si segnalano la stagionalità di alcuni eventi, il rischio di estrazione simbolica nelle riscritture narrative, la commercializzazione delle rigenerazioni infrastrutturali e l'interruzione dei processi al termine dei finanziamenti, come dimostra la sospensione di Archivio Atena.

La trasferibilità mostra geometrie variabili: i casi a vocazione metodologica esplicita (Nanotourism, MAO) e gli strumenti modulari (Sarajevo) presentano un'alta replicabilità, mentre quelli infrastrutturali (Málaga) o ancorati a comunità portatrici specifiche (Tocatì, Papagiannis) richiedono un adattamento più consistente. La transizione rigenerativa non si configura dunque come trasposizione di modelli, ma come traduzione contestuale di repertori, in cui le sei dimensioni iperlocali e i quattro modelli di azione rigenerativa fungono da grammatica comune per leggere casi eterogenei senza ridurli a un denominatore comune.

Successivamente il framework iperlocale, basato su una matrice di lettura del Patrimonio esistente, è stato presentato ai partner nel corso di un focus group online dedicato; da questo confronto sono emersi riscontri positivi sulla capacità dell'approccio di approfondire il legame con le comunità, di rafforzare la dimensione narrativa dei territori e di valorizzare la memoria e le esperienze vissute.

La terza fase, corrispondente al primo focus group, ha consentito di mappare l'ecosistema locale degli attori, il grado di strutturazione delle relazioni, le modalità di interazione e il livello di apertura alla transizione rigenerativa. Questa attività ha prodotto una fotografia qualitativa del tessuto relazionale e istituzionale di ciascun territorio, funzionale alla preparazione delle sessioni successive.

La quarta fase ha coinciso con il secondo focus group (Figg. 7-9), tenuto tra settembre e ottobre 2025 con il coinvolgimento di attori comunitari quali residenti, associazioni di quartiere, piccole e medie imprese del settore turistico, innovatori, giovani, educatori e collettivi civici. Le sessioni, della durata di centoventi minuti, erano articolate in tre momenti: percezioni e rappresentazioni del turismo; barriere e bisogni concreti; ideazione di azioni sperimentabili. I risultati dei due cicli di focus group sono stati infine consolidati in una mappa concettuale transnazionale delle sfide, delle risorse, dei bisogni e degli stakeholder attivabili nei processi di turismo rigenerativo.

Protocollo metodologico e replicabilità | Il protocollo metodologico può essere descritto attra-

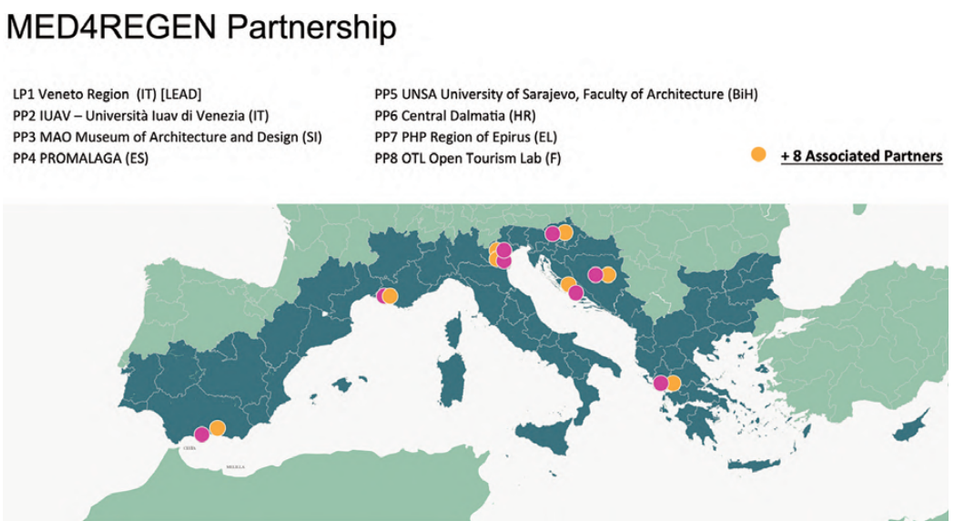


Fig. 3 | Partnership map (credit: Med4Regen 'Iuav' team, 2025).

Heritage	Traces	Narratives	Actions	Events	Imaginaries
Tangible and intangible heritage present in the local area, including landscape, built heritage, traditions, and knowledge	Tangible and intangible traces of specific heritage assets or communities, including places, signs, customs, memories, and everyday practices	Narratives, including recent ones, about a place, a community, or a territorial identity	Existing community-led and citizen-led initiatives	Events already taking place in the local area	Imaginaries associated with the area, such as slow tourism, a contested neighbourhood, or an idealised landscape

Tab. 1 | Hyperlocal research table (source: Fagnoni, 2018; adapted by Med4Regen 'Iuav' team, 2025).

verso sei prospettive operative, alle quali si affianca una distinzione esplicita tra le tipologie di dati prodotti dai focus group (Tab. 3). Per chiarire la natura delle evidenze prodotte e la loro replicabilità è utile distinguere tre livelli del materiale empirico: 'dati osservativi', le dinamiche dei gruppi rilevate dal facilitatore come livelli di partecipazione, asimmetrie comunicative, momenti di consenso o di conflitto; 'dati dichiarativi', ovvero ciò che i partecipanti hanno esplicitamente verbalizzato rispetto a percezioni, bisogni e aspettative, restituito nei report di partner secondo il modello condiviso; 'dati inferenziali', ovvero il prodotto della codifica tematica e della comparazione tra territori coinvolti che rappresentano l'interpretazione analitica del gruppo di ricerca.

I risultati non aspirano alla rappresentatività statistica né alla generalizzazione quantitativa, ma alla costruzione di una conoscenza situata, comparabile e replicabile, fondata sulla tracciabilità del passaggio dal dato grezzo all'inferenza analitica.

Limiti e aperture | I limiti delle attività finora sviluppate e le aperture critiche che ne derivano possono essere ricondotti a tre piani distinti: i limiti propri dell'impianto di ricerca, le barriere strutturali che ostacolano la diffusione dell'approccio e le condizioni di validità che ne governano la trasferibilità.

Sul piano metodologico, l'approccio qualitativo e interpretativo adottato non aspira né alla rappresentatività statistica né alla generalizzazione quantitativa: i risultati, riflettendo le percezioni e le esperienze dei partecipanti ai focus group, non possono essere né automaticamente aggregati né comparati agli esiti raggiunti dalle organizzazioni culturali partner o dalle comunità dei territori coinvolti. La composizione dei gruppi, pur diversificata, è dipesa dalla capacità di ciascun partner di attivare le proprie reti locali, con il rischio di sottorappresentazione di alcune categorie di attori, in particolare dei gruppi marginali, dei giovani e delle minoranze. A questa considerazione se ne aggiunge una più strutturale: gli strumenti elaborati nel WP1 sono stati pensati per favorire la riflessione (Fig. 10) e produrre dati confrontabili tra contesti diversi ma non sono stati progettati per generare consapevolezza nei partecipanti, aspetto rilevante per lo sviluppo e la diffusione dell'impatto prefigurato, e risultano per loro natura parzialmente estrattivi rispetto ai luoghi che osservano e rappresentano.

Sul piano operativo una criticità ricorrente segnalata dai partner riguarda la difficoltà di tradurre i principi dell'approccio iperlocale nel passaggio dall'analisi all'azione e dalla ricerca alla progettazione di interventi rigenerativi. Il coinvolgimento dei residenti si è rivelato una sfida costante: le comunità locali, pur essendo i destinatari primari delle azioni, risultano spesso le più difficili da attivare per ragioni di parziale fiducia nelle Istituzioni, mancanza di tempo o percezione che il turismo sia un problema troppo grande rispetto al quale il singolo contributo appaia poco incisivo.

A queste difficoltà si aggiunge quella di conciliare tra loro logiche economiche di breve periodo e obiettivi rigenerativi di lungo periodo: le organizzazioni culturali operano frequentemente con risorse umane e finanziarie limitate, in contesti di governance frammentata, in cui cultura e turismo afferiscono a settori amministrativi separati e poco coordinati, pertanto la dipendenza da finanziamenti legati a singoli progetti e la rigidità dei quadri normativi di tutela del Patrimonio ostacolano la sperimentazione, mentre l'assenza di indicatori qualitativi e relazionali capaci di misurare l'impatto rigenerativo oltre le metriche economiche convenzionali rende difficile riconoscere e legittimare i risultati ottenuti. Il quadro metodologico iperlocale è stato concepito come replicabile, ma la sua trasferibilità non è automatica e richiede l'esplicitazione delle condizioni di validità che ne garantiscono l'efficacia.

L'adozione di questo modello mostra il proprio potenziale in contesti urbani ad alta densità relazionale, segnati da una forte stratificazione storico-culturale, da un tessuto di comunità identificabili e da una pressione turistica sufficiente a rendere visibili le tensioni tra residenti e visitatori; il quadro mediterraneo in cui Med4Regen opera ne rappresenta un terreno particolarmente fertile per la convergenza tra peso del Patrimonio, intensità dei flussi e radicamento delle Istituzioni culturali.

Sul piano dei prerequisiti istituzionali l'approccio richiede Istituzioni culturali disponibili ad assumere un ruolo relazionale oltre che conservativo, forme di interlocuzione attiva con le comunità di prossimità, una governance locale ricettiva al coordinamento tra cultura e turismo e meccanismi di finanziamento compatibili con tempi lunghi di sperimentazione. In contesti non mediterranei l'applicazione del quadro metodologico richiederebbe adattamenti che riguarderebbero il peso relativo delle sei dimensioni analitiche, la calibrazione delle narrazioni rispetto a tradizioni patrimoniali differenti e la ridefinizione dei modelli di azione in funzione delle dinamiche turistiche locali.

Un'ulteriore sfida si pone laddove le Istituzioni culturali siano deboli, frammentate o assenti: in tali condizioni l'approccio non può poggiare sulla loro funzione di infrastruttura relazionale e deve individuare nodi alternativi quali associazioni civiche, biblioteche, scuole, reti informali di cura del Patrimonio immateriale. Riconoscere queste condizioni significa promuovere una metodologia situata, la cui adozione richiede sempre una calibrazione contestuale e l'integrazione con le competenze locali.

Contributo agli Obiettivi di Sviluppo Sostenibile | Med4Regen dialoga con l'Agenda 2030 lungo tre piani: gli effetti diretti del nucleo metodologico, le sinergie indirette del processo partecipativo e i compromessi tra Obiettivi parzialmente in tensione.

Sul piano metodologico, il progetto attiva quattro Obiettivi: l'SDG 11 (Città e comunità sostenibili) costituisce il riferimento più immediato, poiché Med4Regen interviene su destinazioni urbane mediterranee ad alta pressione turistica per ricomporre il rapporto tra residenti e visitatori e rafforzare vivibilità, inclusività e resilienza dei centri storici; l'SDG 9 (Industria, innovazione e infrastrutture) è perseguito attraverso innovazioni metodologiche trasferibili – il framework iperlocale e lo strumento di autovalutazione – e attraverso il riposizionamento delle Istituzioni culturali come infrastrutture relazionali tra comunità, visitatori e operatori economici; l'SDG 10 (Ridurre le disuguaglianze) è affrontato contrastando le asimmetrie del turismo estrattivo: concentrazione dei benefici, esclusione delle comunità periferiche dalle narrazioni dominanti e progressiva riduzione dell'accesso allo spazio urbano; l'SDG 12 (Consumo e produzione responsabili) è riferibile al paradigma rigenerativo che propone modelli di fruizione fondati sulla qualità dell'esperienza più che sulla sua misurazione quantitativa.

Sul piano delle sinergie indirette il progetto genera ricadute sull'SDG 4 (Istruzione di qualità) attraverso i processi di rafforzamento delle competenze, intesi come apprendimento sociale tra Università, partner pubblici e attori comunitari; sull'SDG 8 (Lavoro dignitoso) tramite la redistribuzione dei benefici turistici verso le economie locali e la valorizzazione di filiere brevi; sull'SDG 17 (Partnership per gli obiettivi) mediante il partenariato transnazionale di sette Paesi mediterranei. Sinergie meno immediate ma rilevanti riguardano l'SDG 5 e l'SDG 16, nella misura in cui i processi partecipativi includono gruppi sottorappresentati e ricostruiscono la fiducia tra comunità e Istituzioni, e l'SDG 13 poiché il turismo rigenerativo si inserisce nel quadro dell'adattamento climatico mediterraneo che orienta il programma Euro-MED.

L'attivazione simultanea di più Obiettivi può tuttavia generare tensioni: tra attrattività economica (SDG 8) e inclusione sociale (SDG 10, 11), che rischia di tradursi in gentrificazione; tra promozione del Patrimonio (SDG 11) e capacità di carico antropico dei siti turistici, che può alimentare l'overtourism; tra innovazione (SDG 9) ed equità digitale (SDG 10); tra consumo responsabile (SDG 12) e ricavi economici di breve periodo (SDG 8); tra coinvolgimento delle comunità (SDG 11, 16) e cultura del progetto, dove l'assenza di quest'ultima rischia di far scadere la partecipazione in partecipazionismo, compromettendo l'apprendimento sociale (SDG 4). La portata rigenerativa di Med4Regen risiede proprio in questo equilibrio dinamico in cui la riflessività progettuale funge da competenza chiave per gestire tali compromessi.

Conclusioni | La prima fase di Med4Regen ha prodotto tre esiti distinti ma interconnessi. Sul piano teorico-metodologico è stato elaborato il quadro metodologico iperlocale, che traduce la convergenza tra Design per i Territori e turismo rigenerativo in una griglia operativa a sei dimensioni analitiche – Patrimonio, Tracce, Narrazioni, Azioni, Eventi, Im-



Fig. 4 | Four regenerative approaches (credit: Med4Regen 'Iuav' team, 2025).

maginario – integrata da quattro modelli di azione rigenerativa – Riparare, Riconnettere, Riattivare, Redistribuire – e in uno strumento di autovalutazione a dieci dimensioni concepito come dispositivo agile per ricercatori, progettisti e attori locali.

Sul piano empirico la ricerca ha generato una base di conoscenza qualitativa transnazionale sulle percezioni, sui bisogni e sulle tensioni espresse da Istituzioni culturali e comunità locali in sette Paesi mediterranei, restituita in una mappa concettuale comparabile, pur nel rispetto delle specificità territoriali. Sul piano procedurale è stata validata una metodologia di focus group strutturati, replicabile e adattabile, che si è dimostrata efficace come dispositivo di ascolto, co-diagnosi e co-progettazione tra attori istituzionali, culturali e comunitari.

Gli esiti raggiunti vanno letti entro vincoli precisi poiché l'impianto qualitativo e interpretativo della ricerca non aspira alla rappresentatività statistica; la composizione dei gruppi dipende dalla capacità di ciascun partner di attivare le proprie reti territoriali. A queste considerazioni se ne aggiunge una più strutturale: gli strumenti sviluppati nel WP1 producono dati confrontabili non progettati per generare consapevolezza nei partecipanti e risultano per loro stessa natura parzialmente estrattivi rispetto ai contesti che osservano: riconoscere questo limite è il presupposto per la loro adozione consapevole nelle fasi successive.

La trasferibilità del framework iperlocale, concepito fin dall'origine come metodologia replicabile, può essere ora valutata su tre livelli: tipologico, geografico e tematico. Lo strumento di autovalutazione si presta a essere adottato da Istituzioni culturali, Amministrazioni e gruppi di ricerca su scale e progetti differenti; la metodologia, sviluppata in contesti mediterranei ad alta pressione turistica, può essere estesa ad altre destinazioni urbane europee con dinamiche analoghe; le sei dimensioni analitiche e i quattro modelli di azione possono inoltre fungere da matrice di lettura per processi di rigenerazione non turistica, dal welfare urbano alla valorizzazione dei Beni culturali comuni. In ogni caso la trasferibilità non è automatica e richiede una calibrazione contestuale e l'integrazione delle competenze locali.

Il WP1 di Med4Regen è stato incentrato sulla costruzione di una visione comune tra gli operatori del consorzio in modo da fornire nel WP2 un processo di formazione per i musei e un trasferimento efficace ai decisori politici nel WP3. Al momento della stesura di questo contributo restano aperte, sul piano scientifico, alcune questioni di rilievo: lo sviluppo di indicatori qualitativi e relazionali in grado di stabilire l'impatto rigenerativo oltre le metriche economiche convenzionali; la costruzione di metodologie capaci di valutare nel tempo le trasformazioni indotte nei tessuti urbani; l'elaborazione di strategie più efficaci per il coinvolgimento dei gruppi marginali; l'approfondimento del rapporto tra approccio iperlocale e processi decisionali pubblici, soprattutto laddove cultura e turismo afferiscono a settori amministrativi separati.

Su questo terreno scientifico-operativo si innesta una riflessione più ampia che riguarda il ruolo del designer nei processi di turismo rigenerativo e la cultura del progetto che li deve supportare. Interrogarsi su questo è indispensabile per non scivolare nei due equivoci che Manzini (2016) ha già identificato: da un lato la riduzione del progetto a una sequenza efficiente di soluzioni tecniche (soluzionismo); dall'altro la dissoluzione del progettista in una figura meramente facilitatrice, neutra solo in apparenza, che raccoglie contributi senza apportare cultura del progetto, visioni e criteri di qualità (partecipazionismo).

Entrambi i rischi sono presenti nei processi di turismo rigenerativo: il primo quando si confonde il toolkit con la rigenerazione stessa; il secondo quando si convoca la comunità senza che il designer costruisca con essa un terreno condiviso di temi, prospettive e possibilità di azione. È qui che il concetto di 'design reflexivity' elaborato da Smit, Melissen e Font (2024) diventa centrale sul piano operativo, in quanto i tre autori identificano tre meccanismi di riflessività che devono attraversare ogni processo di co-progettazione di sistemi turistici: la definizione del problema, la definizione del metodo e la definizione degli stakeholder. In questo quadro la riflessività non è una qualità innata del designer ma una competenza che si costruisce metodologicamente e deve essere praticata per diventare parte del suo patrimonio procedurale.

Questo ci riporta alla radice epistemologica del Design per i Territori. Parente (2016) descrive l'approccio disciplinare come fondato sulla conoscenza situata (Lave and Wenger, 1990) e sulla pratica riflessiva (Schön, 1993). Fagnoni (2021) sostiene che il designer lavora oltre la soluzione del problema, per studiare e offrire opportunità attraverso il progetto di prodotti-servizi per il territorio, la città, la cultura, per i cittadini e con i cittadini. Ciò significa che il processo partecipativo non è semplice supporto al progetto ma la costruzione delle capacità collettive di cui parla Dredge (2022) quando descrive il turismo rigenerativo come cambiamento dei modelli mentali.

Sempre Fagnoni (2021) aggiunge che gran parte della progettazione si concentra sul promuovere la ricerca del senso e della consapevolezza senza inseguire l'efficienza del prodotto-servizio fine a se stesso. Il modello integrato adottato dal progetto Med4Regen, costituito da tre componenti – il framework iperlocale, lo strumento di autovalutazione e la metodologia dei focus group – si rivela utile nella misura in cui supporta la ricerca di possibilità rigenerative e produce dati confrontabili per loro stessa natura 'estrattivi', non volti a generare consapevolezza nei partecipanti.

Il designer che emerge da questa convergenza teorica non coincide né con un semplice facilitatore, né con un tecnico esecutore, né con un osservatore neutrale; è un professionista riflessivo che porta una cultura del progetto, la mette in gioco dialogicamente con le culture degli altri attori, costruisce metodologicamente la propria riflessività rispetto ai meccanismi di definizione del problema, del metodo e degli stakeholder e orienta l'intero processo non alla sola efficienza della soluzione ma alla crescita della consapevolezza collettiva. In questo senso la questione non è soltanto tecnica ma riguarda anzitutto la postura progettuale; richiede designer capaci di abitare l'incertezza del processo senza risolverla prematuramente, di tenere aperta la tensione tra ciò che il territorio è e ciò che potrebbe diventare e di restituire questa tensione alle comunità come risorsa generativa piuttosto che come problema da chiudere.

In the new Italian edition of Il Giocattolo del Mondo – Venezia nell'Epoca dell'Iperturismo, Robert C. Davis (2022) entitles the final chapter with a Venetian saying: 'chi ciapa i schei xe contento, i altri no'

(lit. 'those who take the money are happy, everyone else is not'). The sentence is not a joke: those who profit from tourism are concerned with little beyond profit extraction. When a city ceases to be an inhabited place and becomes a machine for extracting tourism value, benefits are concentrated among a few actors, while disruption and costs, including the disappearance of services, the loss of identity, and rising rents, are distributed across the entire territory. Those unable to coexist with, or capitalise on, this monoculture leave the city, either by moving away or by psychologically resigning themselves to living within a stage set: over the last thirty years, the City of Venice has lost more than one third of its residents, and its historic centre may be completely depopulated by 2054 (Davis, 2022).

Venice is a city that, for centuries, has built its identity on the utopia of its existence on water, on the ingenuity, and on the uniqueness of its inhabitants (Calvino, 1995), and is now losing its vital substance because tourism has imposed itself as a monoculture that consumes the very conditions that make it possible (Zanardi, 2020). For visitors, the city has become a consumable good to be photographed and traversed rapidly in an attempt to grasp and possess its collective imaginary. It therefore becomes a negative reference point for many urban centres where mass tourism corrupts and impoverishes the social fabric while simultaneously generating new economic spillovers. Approximately thirteen years have passed since the introduction of digital platforms for very short-term rentals; the urban transformations they have produced in numerous cities, widely discussed in the literature, find in the case of Venice (Bertocchi et alii, 2020) one of the most cited examples of gentrification dynamics and the progressive residential hollowing-out of historic centres (Cocola-Gant, 2018).

A destination for tourists from all over the world, Venice is reached through routes that cross the European continent and Italy, as well as by sea along the cruise routes (Fig. 1) of the Mediterranean tourism system. This system remains a highly desirable destination, despite being an ecosystem under stress due to climate change, environmental damage, and growing social pressures. To preserve its attractiveness and resilience, alongside the monitoring of anthropogenic impacts using quantitative instruments that have become established international standards (Sposito and De Giovanni, 2023), development actions are needed to construct new tourism models that prioritise sustainability and the regenerative capacity of interventions. Within this context, researchers from the Università 'Iuav' di Venezia (Silvia Maria Carolo and Mario Ciaramitaro), with the support of the EU project consultant Paolo Carlucci, developed a project proposal in 2024 to test actions capable of reversing the current trend, with the aim of proposing a different model of responsible and conscious cultural tourism.

The research hypothesis is that this outcome can be achieved by networking local associations and cultural institutions, fostering an alliance between citizens and visitors, and addressing several major contemporary challenges (Fig. 2): countering mass tourism and dominant tourism narratives, offering an alternative model through the active role of urban cultural centres and those located in peripheral areas, and enhancing scientific and natural heritage through principles of environmental and social sustainability.

The project, named Med4Regen, received funding under the Euro-MED European territorial cooperation programme and is grounded in the awareness that local cultural institutions already possess a consolidated heritage of relationships with their reference communities. This relational capital can support the transformation of museums[1], cultural centres, and local tangible and intangible heritage into strategic resources for more sustainable forms of regenerative tourism.

To achieve this objective, the project is structured around four main phases: 1) analysis of the context and of the ways in which tourism is perceived and experienced at the local scale; 2) training and capacity building for cultural institutions, enabling them to acquire co-design tools and methodologies; 3) implementation of pilot actions aimed at constructing a regenerative tourism offer; and 4) dissemination of the results to public decision-makers and policymakers.

The objective is therefore to move beyond the paradigm of sustainability, understood mainly in a conservative sense, towards a form of regenerative tourism capable of combining environmental urgencies with economic and social sustainability, based on inclusion, rights, and wellbeing, and oriented towards greater equity. From this perspective, consistent with the objectives of the 2030 Agenda (UN, 2015), the harmonisation of economic, social, and environmental factors can generate positive impacts for places and host communities (Fig. 3).

Med4Regen develops a reflection on regenerative tourism through a diversified partnership, bringing together specific expertise and organisations based in cities shaped by tourism across the Mediterranean area: Veneto Region – Department of Cultural Heritage, Cultural Activities and Sport (Italy), Università 'Iuav' di Venezia (Italy), Promálaga (Spain), Region of Epirus (Greece), Faculty of Architecture of Sarajevo (Bosnia and Herzegovina), Open Tourisme Lab in Nîmes (France), Tourist Board of Split-Dalmatia County (Croatia), and the Museum of Architecture and Design in Ljubljana (Slovenia).

Against the background outlined above, the contribution has a threefold objective: first, it proposes a theoretical framework that brings Design for Territories into dialogue with the emerging paradigm of regenerative tourism, filling a gap in the literature, which has so far privileged marginal and rural contexts while neglecting urban dynamics under high tourism pressure; second, it documents and critically analyses the 'hyperlocal' framework and the participatory process developed in the first phase of the European Med4Regen project, providing an operational methodology for the regenerative transition of tourism in Mediterranean contexts based on co-diagnosis and co-design tools; third, it aims to provide an investigative model for researchers, designers, and policymakers who intend to position cultural institutions custodians of identity and territorial cohesion, and as relational

Dimensions	Checkpoint questions
Heritage	Which tangible and intangible heritage resources have been identified (landscape, architecture, traditions, knowledge)? How will they be connected to the project? To what extent are they recognised and valorised?
Traces	Which tangible or intangible traces have been identified (places, signs, customs, memories)? How will they be used? Are they integrated into the project narrative?
Narratives	Have narratives, including recent ones, about the community and its territory been collected? How do they shape the project? To what extent have they informed or guided the design process?
Actions	Have existing initiatives by citizens or associations been mapped? How? To what extent does the project connect to or strengthen these initiatives?
Events	Are there events that structure the cultural or social life of the area? To what extent does the project enhance, support, or create synergies with them?
Imaginaries	Which imaginaries characterise the place (for example, slow tourism, a contested neighbourhood, or an idealised landscape)? Does the project help to reinforce, transform, or redefine these imaginaries?
Regenerative action models	Which regenerative action models are intended to be adopted (select at least two of the following): Repair (restoring ecosystems, biodiversity, and built heritage); Reconnect (creating authentic connections between visitors and residents, humans and nature, and generations); Re-engage (involving stakeholders in tourism governance and civic participation); Redistribute (supporting the equitable distribution of economic benefits, the local economy, and quality employment)

Tab. 2 | Self-Assessment Tool: Hyperlocal approach (credit: Med4Regen 'Iuav' team, 2025).

infrastructures (Battaglini, 2024) between communities and visitors.

Theoretical and methodological framework | The project is based on two fundamental axes: regenerative tourism and Design for Territories. These disciplinary fields orient the project towards rebalancing the relationship between visitors, residents, and the urban context, taking the correlation between urban welfare and tourism as an essential premise (Ricci, Poli and Marino, 2025).

To operate within regenerative tourism, the design disciplines must assume new objectives and responsibilities. Through co-design processes, designers and local actors act as facilitators, promoters, and initiators of concrete actions in their relationships with communities and territories. Often incorrectly defined as an evolution of sustainable tourism (Bellato and Pollock, 2025), which aims to mitigate environmental impact, including through the proposal and support of slow tourism practices (Cimadomo, Lecardane and Torregrossa, 2025), regenerative tourism instead aims to strengthen the vitality of places and communities, emphasising a change in mindsets that shifts from an individual point of view to a collective perspective (Mang and Reed, 2012; Dredge, 2022).

Adopting this approach entails moving beyond practices focused exclusively on impact management and monitoring, thereby enabling the development of transformative processes capable of producing social, environmental, cultural, and economic value. Following Camrass (2020), regeneration is not a final condition but a continuous process of adaptation and learning in which design, by supporting and promoting participatory processes for capacity building and knowledge sharing, becomes an instrument of cultural evolution and social learning. By adopting a hyperlocal approach, the designer co-designs with residents, placing local knowledge and resources at the centre: this is a prerequisite for developing regenerative tourism solutions that are rooted in, and coherent with, their contexts.

Within this perspective, the present research refers to the field of Design for Territories (Parente and Sedini, 2017; Bosco, Bonini Lessing and Parente, 2025), aimed at enhancing a specific site, while embracing and re-signifying objectives, methods, and tools that, reformulated according to the strategic requirements of European project design, support partners in a capacity-building process that guides and promotes regenerative tourism practices adaptable to different contexts.

In Med4Regen, Design for Territories tools, which have focused particularly on the enhancement of marginal, rural, and inland areas (low-density zones affected by depopulation) and on projects oriented towards sustainable tourism, are tested and reconfigured for application in urban and extra-urban contexts subject to overtourism and already characterised by the presence of attractive cultural spaces. Museums and cultural centres are repositioned by the research as cultural hubs capable of aggregating and orienting networks of associations and local actors, connecting resident communities and tourists, and acting as engines for the development of regenerative tourism activities.

This process may constitute a model that can be iterated over time and adapted to different territories, where networks of responsible and aware local interlocutors, including cultural centres, resident communities, and visitors, can in turn trigger regenerative actions by adopting the dedicated tools made available through the local capacity-building process, thereby multiplying the impacts of the research.

The state of the art in the international debate | The field of Design for Territories has consolidated since the late 1990s, progressively evolving from a conception of territory as the mere context of design to one that understands it as both the object and the relational system of intervention.

Parente and Sedini (2017) reconstruct this trajectory by distinguishing three approaches – design in, of, and for the territory – and showing how the latter integrates and expands the previous two by taking territorial capital as the fulcrum of multi-actor design strategies. Tamborrini (2019) extends this articulation by proposing design 'with' the territory, in which place becomes an integral part of the process and the University operates as a relational node between designers and enterprises for sustainable innovation.

From this perspective, Villari (2012, 2024) proposes a community-centred approach that articulates the role of local communities as beneficiaries, co-designers, and activators of innovation, outlining scenarios – design with, for, and by communities (Villari, 2021) – that convey the complexity of participatory processes at the local scale. The role of community in Design for Territories is addressed, for example, by Brignoni et alii (2023), who, in developing a taxonomy for mapping design-driven regeneration interventions in small fortified towns and inland areas, use the temporal dimension and the degree of community involvement as interdependent variables.

At the cultural level, Manzini (2016) argues for the need to overcome the limits of solutionism and participationism, which impoverish emerging design, and proposes a dialogic approach in which designers contribute visions, values, and quality criteria, rather than merely facilitating processes. Cruz, Rocha, and Rodrigues (2025) underline the centrality of the territorial dimension in design investigations and confirm the value of interdisciplinarity in research that connects design and context, identifying the methods that recur most frequently.

The territorial dimension is central to recent definitions of regenerative tourism, which actively seeks to improve the health and vitality of the socio-ecological systems of which tourism is an integral part (Bellato and Pollock, 2025; Dredge, 2022). From this perspective, tourism does not simply 'avoid harming' the environment or local communities, but becomes an instrument of co-evolution between people, places, and nature, contributing to shared prosperity and territorial resilience (Mang and Reed, 2012). According to Bellato and Pollock (2025), regenerative tourism is based on an ecological and systemic paradigm that recognises the world as a set of interconnected living systems.

This vision implies that every tourism intervention should contribute to the regeneration of local vital processes, rather than extracting value from them. Tourism is therefore conceived as a process of mutual care and regeneration among visitors, communities, and environments through three core elements: a living-systems perspective, which considers places as complex and interdependent organisms; the centrality of place and communities, through practices that enhance local knowledge and foster an authentic connection with the territory; and the overcoming of a mechanistic and lin-

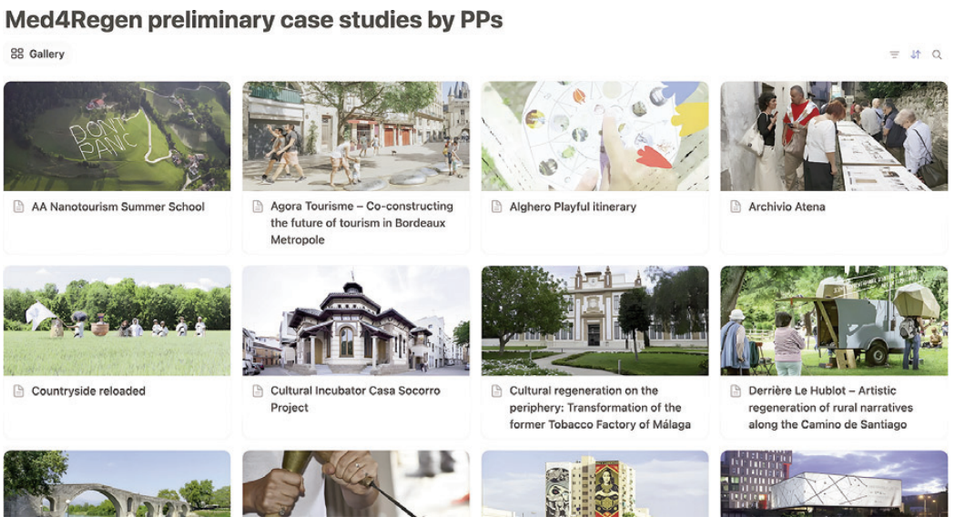


Fig. 5 | Case studies selected by the partnership, 2025 (credit: Med4Regen 'Iuav' team, 2025).



Fig. 6 | Museum in the Community by MAO, Ljubljana, a case study particularly appreciated by the partnership for the way it involved the Fužine neighbourhood community (credit: MAO Architectural Museum Ljubljana, M. Rušt, and K. Goljat, 2025).

ear vision of economic growth in favour of an ecosystemic vision based on relationships, wellbeing, and co-evolution (Bellato and Pollock, 2025; Dredge, 2022; Mang and Reed, 2012). Dredge (2022) describes this shift as an evolution from tourism managed according to linear planning and scientific-management logics towards tourism understood as a complex adaptive system, in which value emerges from connections and interactions among actors and environments.

The roots of the literature that most closely connects design to place in keeping with a regenerative approach can be traced to Norman W. Sheehan's work (2011) on Respectful Design, grounded in Indigenous knowledge. Sheehan proposes a vision of design as an active intersection between materials, products, social interactions, and environments, rooted in the awareness that natural systems and human communities are living, interdependent entities endowed with their own relational intelligence.

Although they operate on different disciplinary planes, three strands share a common concern with the situated dimension (Parente, Lupo and Sedini, 2018) of design. Ezio Manzini (2010) defines social innovation through four key attributes – small, local, open, and connected – that characterise locally distributed design systems and show how design affects the structures of everyday life (Manzini, 2018). Fagnoni (2018) has explored the circular relationship between design and territory, identifying traces (memory, culture, and imaginary) as the generative material for products, services, and actions, and articulating development around culture, people, and economy. Fagnoni (2022) subsequently introduced the concept of 'alert design', identifying hyperlocal micro-actions oriented towards survival and care.

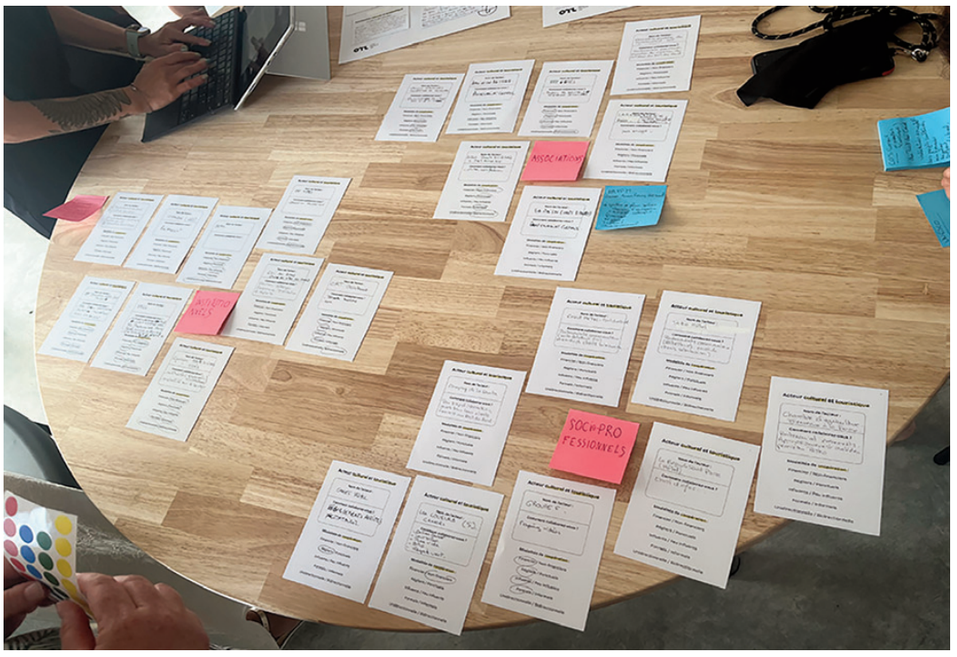
However, the literature examined, both within Design for Territories and in related strands, focuses predominantly on marginal, rural, or low-density contexts as fields of application, or on perspectives centred on impact mitigation, the optimisation of individual experience, or the construction of visual identities. This latter aspect is also a recurring feature in the literature on 'place branding', where Kavaratzis, Warnaby, and Ashworth (2015) have called for the overcoming of purely communicative approaches in favour of the integral development of territorial brands based on culture, identity, and stakeholder engagement. In the more recent debate, for example, territorial identity has also been investigated as a scalable communicative device capable of organising and making legible the complexity of places through coherent visual and narrative systems (Trocchianesi, 2012; Casarotto and Oddone, 2024).

The research lines outlined above privilege the enhancement of marginal and low-density areas, the strengthening of territorial visual identities, and innovation in the individual visit experience, leaving debate on urban contexts under high tourism pressure fragmented and largely located within disciplines outside Design for Territories, particularly urban planning and studies on the governance of tourism territories. On this basis, the contribution is articulated on three complementary and verifiable levels.

At the contextual level, the research intentionally shifts the field of application of Design for Territories from rural and marginal contexts (Brignoni et alii, 2023; Fagnoni, 2018, 2022; Pereno and Barbero, 2020) to Mediterranean urban contexts characterised by tourism overload and structural tensions between residents and visitors.

At the methodological level, the contribution does not adopt generic co-design tools or a purely analytical matrix for assessing local tourism systems. Instead, it proposes an integrated model with three components: the hyperlocal methodological framework, derived from an extension of Fagnoni's Circular Model (2018) and articulated through six dimensions for reading the territory – Heritage, Traces, Narratives, Actions, Events, and Imaginary – crossed with four models of regenerative action – Repair, Reconnect, Reactivate, and Redistribute; a ten-dimension self-assessment tool, which enables researchers, designers, and local actors to verify the degree to which the approach is integrated into any territorial project; and a pro-





Figg. 7, 8 | Focus group conducted by Open Tourism Lab (credits: Open Tourism Lab, 2025).

tocol for structured and comparable focus groups shared by eight partners in seven Mediterranean countries, which produces comparable qualitative data and supports the transnational dimension of the research. The combination of these factors distinguishes the contribution both from approaches centred on the use of single participatory tools and from the adoption of quantitative methodologies for impact monitoring, constituting its main point of originality.

At the cultural level, the positioning of museums and cultural institutions as relational infrastructures (Battaglini, 2024) between resident communities and visitors shifts the museum debate beyond the traditional polarities of heritage enhancement, innovation in the visit experience, and the integrated management of visitor-use data (Rosmino, 2024; Villani, Romagna and Oddi, 2024). It assigns cultural institutions a mediating function between the inhabited city and the visited city; this repositioning is empirically verified through the selection of nine case studies collected by the partnership and two cycles of focus groups, and it is configured as an operational structure replicable in other Mediterranean contexts.

Objectives of the first phase of Med4Regen | Work Package 1 of Med4Regen pursued three interconnected objectives. At the theoretical and methodological level, it developed a shared framework, defined as the 'hyperlocal approach', for reading the Mediterranean territories of the partnership through a regenerative lens, moving beyond standardised tourism planning and anchoring regenerative tourism to micro-territorial dynamics: tangible and intangible heritage, proximity networks, collective memories, and local imaginaries.

Second, the research collected structured qualitative data on the perceptions, needs, and tensions expressed by cultural organisations (museums, cultural centres, and foundations) and local communities (residents, associations, SMEs, and tourism operators), building a transnational knowledge base useful for orienting subsequent pilot actions and identifying concrete levers for the regenerative transition. Across the process, the effectiveness of participatory design tools – structured focus groups, evaluation matrices, and systemic mapping – was tested as a set of devices for listening, co-diagnosis, and co-design among institutional, cultural, and community actors in heterogeneous Mediterranean contexts.

Hyperlocal framework and research for regenerative actions | The methodological structure of the activity was based on two complementary cores: the development of the hyperlocal framework and the design of a participatory research process articulated through focus groups. The hyperlocal framework, developed by Università 'Iuav' di Venezia (PP2), emerged from the convergence between Design for Territories practices and the principles of regenerative tourism.

The methodological framework based on Fagnoni's circular approach (2018) moves beyond a merely geographical understanding of the term 'local' and introduces a relational, qualitative, and temporal perspective. It is structured around six analytical dimensions (Tab. 1) – Heritage, Traces, Narratives, Actions, Events, and Imaginary – which function as lenses through which to investigate the specificities of a territory, its historical and cultural stratifications, and the transformative possibilities that derive from them. These dimensions are accompanied by four models of regenerative action – Repair, Reconnect, Reactivate, and Redistribute – identified by the research partner Open Tourisme Lab (OTL; Fig. 4), which orient the translation of research data into concrete design interventions.

The hyperlocal framework was conceived from the outset as a transferable methodology: it represents an initial step for capacity building, useful for questioning associations and institutions about how they interpret the territory and for promoting, through new lenses, a different design orientation. The core principle is that tacit knowledge, collective memory, and the imaginaries of a place cannot become private resources; they must always be returned to, and connected with, the communities that preserve them. To this end, a ten-dimension self-assessment tool was defined – Heritage, Traces, Narratives, Actions, Events, Imaginary, Repair, Reconnect, Reactivate, and Redistribute – offering an agile and replicable mode of self-assessment that can be used by researchers, designers, and local actors to verify the degree of integration of the hyperlocal approach and regenerative principles in any territorial project (Tab. 2).

In parallel, Iuav and the research partner OTL prepared a structured methodology for the focus groups, conceived as a tool for qualitative data collection and participatory activation (Muratovski, 2022). The methodology, proposed to the other research partners and subsequently refined on the basis of shared contributions, includes the use of tools inspired by Design Thinking, systemic stakeholder mappings, matrices for assessing regenerative readiness, exercises for the collective definition of priorities, and project sheets for micro-experiments. These tools were included in working sessions lasting two or three hours, with groups of four to eight participants, facilitated by a moderator and a rapporteur. All partners carried out their respective focus groups within the timeframes defined by the project, using a shared model for field action and for the presentation of results, thereby ensuring the analytical comparability of outcomes while respecting local specificities.

The activity was developed through a process articulated in four phases, connected both logically and chronologically. The first phase, dedicated to the analysis of the case studies identified by each partner (Figg. 5, 6), highlighted the prevalence of initiatives oriented towards the transformation of tourism narratives and the enhancement of landscape heritage, with a marked predominance of long-term projects and local communities as the primary beneficiaries.

The nine cases gathered by the Med4Regen partnership, with heterogeneous contexts and differentiated scales, cover the full spectrum of the thirty-five case studies collected: from the object-

device of the Alghero Playful Itinerary to the neighbourhood scale (Museum in the Community by MAO in Fužine and Urban Pop-up in the Museums Quarter of Sarajevo), from the rural community (Papagiannis Museum in Ioannina and Archivio Atena in Campania) to the metropolitan port system of Reclaiming the Waterfront in Málaga, and finally to the territorial and transnational network of Derrière Le Hublot along the GR65, the AA Nanotourism Summer School, and Tocatì, a festival of historic games recognised as a UNESCO Good Practice.

The promoting actors, covering the full institutional spectrum through local administrations, museums, infrastructure authorities, schools of architecture, non-profit associations, and community cooperatives, are all oriented towards resident communities, and their regenerative objectives are polarised along the project challenges: countering dominant tourism narratives proceeds through the careful re-narration of places and the enhancement of memory (Alghero, Nanotourism, Derrière Le Hublot, and Archivio Atena); the activation of urban and peri-urban cultural centres transforms museums into relational infrastructures of proximity (MAO, Sarajevo, and Papagiannis); the response to overtourism redistributes pressure through the reconversion of urban waterfronts (Málaga); and the safeguarding of intangible heritage constructs international networks of communities of practice (Tocatì).

The methodologies converge around the participatory and hyperlocal approach, articulated through distinct devices (gamification, co-design of public space, site-specific prototyping, modular pop-ups, artistic commissions, participatory digital archives, and festivals), and generate outcomes ranging from tangible products to consolidated relational infrastructures and international recognition. Recurring strengths concern the quality of the relationship between institutions and communities, the reusability of devices, and long-term duration; barriers concern fragmented governance, the rigidity of regulatory frameworks, and the difficulty of activating residents; limitations include the seasonality of some events, the risk of symbolic extraction in narrative rewritings, the commercialisation of infrastructural regeneration, and the interruption of processes once funding ends, as demonstrated by the suspension of Archivio Atena.

Transferability is uneven: cases with an explicit methodological vocation (Nanotourism and MAO) and modular tools (Sarajevo) present high replicability, while infrastructural cases (Málaga) or those anchored in specific bearer communities (Tocatì and Papagiannis) require more substantial adaptation. The regenerative transition is therefore not the transposition of models but the contextual translation of repertoires, in which the six hyperlocal dimensions and the four regenerative-action models function as a common grammar for reading heterogeneous cases without reducing them to a common denominator.

The hyperlocal framework, based on a matrix for reading existing heritage, was subsequently presented to the partners during a dedicated online focus group; this exchange produced positive feedback on the approach's capacity to deepen the connection with communities, strengthen the narrative dimension of territories, and enhance memory and lived experiences.

The third phase, corresponding to the first focus group, enabled the mapping of the local ecosystem of actors, the degree of structuring of relationships, the modes of interaction, and the level of openness to the regenerative transition. This activity produced a qualitative picture of the relational and institutional fabric of each territory, functional to the preparation of subsequent sessions.

The fourth phase coincided with the second focus group (Figg. 7-9), held between September and October 2025 with the involvement of community actors such as residents, neighbourhood associations, small and medium-sized enterprises in the tourism sector, innovators, young people, educators, and civic collectives. The sessions, lasting one hundred and twenty minutes, were articulated in three moments: perceptions and representations of tourism; barriers and concrete needs; and the ideation of testable actions. The results of the two focus-group cycles were finally consolidated in a transnational conceptual map of the challenges, resources, needs, and stakeholders that can be activated in regenerative tourism processes.

Methodological protocol and replicability | The methodological protocol can be described through six operational perspectives, alongside an explicit distinction between the types of data produced by the focus groups (Tab. 3). To clarify the nature of the evidence produced and its replicability, it is useful to distinguish three levels of empirical material: 'observational data' refer to group dynamics recorded by the facilitator, such as levels of participation, communicative asymmetries, and moments of consensus or conflict; 'declarative data' refer to what participants explicitly verbalised in relation to perceptions, needs, and expectations, as returned in the partner reports according to the shared model; and 'inferential data' refer to the outcome of thematic coding and comparison among the territories involved, representing the analytical interpretation of the research group.

The results do not aim for statistical representativeness or quantitative generalisation, but for the construction of situated, comparable, and replicable knowledge based on the traceability of the passage from raw data to analytical inference.

Limits and openings | The limits of the activities developed so far, and the critical openings that derive from them, can be traced to three distinct planes: the limits inherent to the research design, the structural barriers that hinder the dissemination of the approach, and the validity conditions that govern its transferability.

At the methodological level, the qualitative and interpretative approach adopted does not aspire either to statistical representativeness or to quantitative generalisation: the results, reflecting the perceptions and experiences of focus-group participants, cannot be automatically aggregated or compared with the outcomes achieved by partner cultural organisations or by the communities of the territories involved. Although diversified, the composition of the groups depended on each partner's capacity to activate its local networks, with the risk that some categories of actors, particularly marginal groups, young people, and minorities, may be underrepresented. This is compounded by a more structural consideration: the tools developed in WP1 were designed to encourage reflection (Fig. 10) and produce comparable data across different contexts, but they were not designed to generate awareness among participants, an aspect that is relevant to the development and dissemination of the anticipated impact, and they are by their nature partially extractive with respect to the places they observe and represent.

At the operational level, a recurring critical issue reported by the partners concerns the difficulty of translating the principles of the hyperlocal ap-

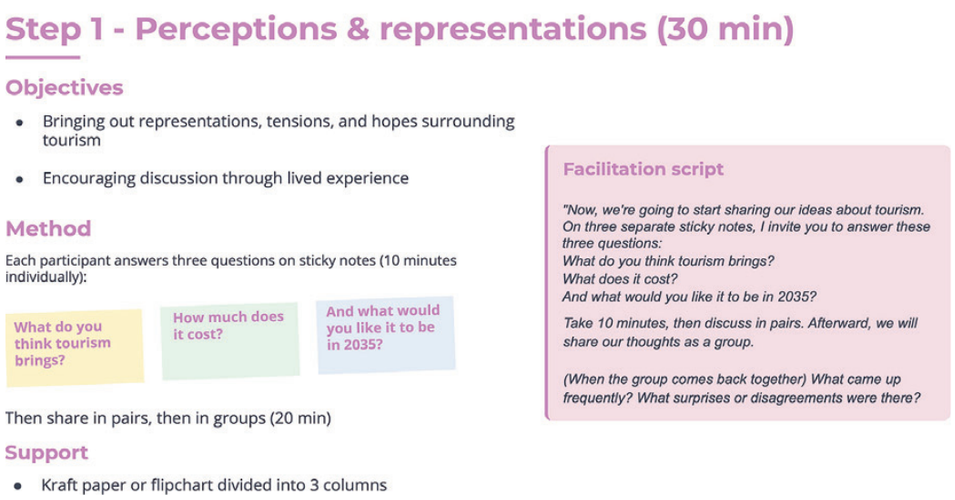


Fig. 9 | Slide from focus group 2, which invited participants to reflect on their capacity to intervene in tourism mechanisms (credit: Med4Regen 'Iuav' team, 2025).

proach in the transition from analysis to action and from research to the design of regenerative interventions. Resident involvement proved to be a constant challenge: although local communities are the primary addressees of the actions, they are often the most difficult to activate because of partial trust in institutions, lack of time, or the perception that tourism is too large a problem for an individual contribution to appear effective.

These difficulties are compounded by the challenge of reconciling short-term economic logics with long-term regenerative objectives: cultural organisations frequently operate with limited human and financial resources, in contexts of fragmented governance, where culture and tourism fall under separate and poorly coordinated administrative sectors. Dependence on funding tied to individual projects and the rigidity of heritage-protection regulatory frameworks hinder experimentation, while the absence of qualitative and relational indicators capable of measuring regenerative impact beyond conventional economic metrics makes it difficult to recognise and legitimise the results obtained. The hyperlocal methodological framework was conceived as replicable, but its transferability is not automatic and requires the explicit definition of the validity conditions that ensure its effectiveness.

The adoption of this model shows its potential in urban contexts with high relational density, marked by strong historical and cultural stratification, by a fabric of identifiable communities, and by sufficient tourism pressure to make tensions between residents and visitors visible; the Mediterranean framework in which Med4Regen operates represents a particularly fertile ground for the convergence of heritage weight, intensity of flows, and the rootedness of cultural institutions.

In terms of institutional prerequisites, the approach requires cultural institutions willing to assume a relational as well as a conservative role, forms of active interlocution with proximity communities, local governance receptive to coordination between culture and tourism, and funding mechanisms compatible with long experimental timeframes. In non-Mediterranean contexts, the application of the methodological framework would require adaptations concerning the relative weight of the six analytical dimensions, the calibration of narratives in relation to different heritage traditions, and the redefinition of action models according to local tourism dynamics.

A further challenge arises where cultural institutions are weak, fragmented, or absent: under such conditions, the approach cannot rely on their function as relational infrastructure and must identify alternative nodes, such as civic associations, libraries, schools, or informal networks for the care of intangible heritage. Recognising these conditions means promoting a situated methodology, whose adoption always requires contextual calibration and integration with local expertise.

Contribution to the Sustainable Development Goals | Med4Regen engages with the 2030 Agenda on three levels: the direct effects of its methodological core, the indirect synergies of the participatory process, and the trade-offs between Goals that are partly in tension.

At the methodological level, the project activates four Goals. SDG 11 (Sustainable Cities and Communities) constitutes the most immediate reference, as Med4Regen intervenes in Mediterranean urban destinations under high tourism pressure in order to recompose the relationship between residents and visitors and strengthen the liveability, inclusiveness, and resilience of historic centres. SDG 9 (Industry, Innovation and Infrastructure) is pursued through transferable methodological innovations – the hyperlocal framework and the self-assessment tool – and through the repositioning of cultural institutions as relational infrastructures between communities, visitors, and economic operators. SDG 10 (Reduced Inequalities) is addressed by countering the asymmetries of extractive tourism: the concentration of benefits, the exclusion of peripheral communities from dominant narratives, and the progressive reduction of access

Operational perspective	Description
Partner and case-study selection	The Med4Regen partnership was assembled according to criteria of territorial and typological diversity, in order to cover a sufficiently broad range of Mediterranean tourism pressures: high-intensity urban areas (Venice/Mestre, Málaga), heritage landscapes (Pont du Gard), post-conflict urban contexts (Sarajevo), mid-sized cultural capitals (Ljubljana), and rural or semi-rural territories (Sinj / Split-Dalmatia, Epirus); each partner identified a reference case study – a cultural site or proximity area – to anchor the listening and co-design activities, ensuring coherence between the scale of inquiry and the scale of the subsequent pilot actions
Participant recruitment criteria	Recruitment was managed by each partner through their local networks, on the basis of criteria shared by the consortium; the first focus-group cycle involved cultural organisations (museums, cultural centres, and foundations) and tourism-system operators; the second cycle mobilised community actors, such as residents, neighbourhood associations, educators, youth groups, volunteers, users of cultural services, and SMEs; group composition was intentionally heterogeneous, in order to include a plurality of voices, while acknowledging that reliance on partners' networks may underrepresent some actor categories
Duration, roles, and focus-group tools	The sessions were held in person, with a duration of 120 minutes for the second cycle and up to three hours for the first, in groups of four to eight participants, facilitated by a moderator and a rapporteur; operational tools, drawn from design thinking, included systemic stakeholder mapping, matrices for assessing regenerative readiness, collective priority-setting exercises, and project briefs for micro-experiments; the hyperlocal self-assessment tool, structured around ten dimensions, functioned as a cross-cutting device for reading territories
Data collection grid	The sessions were structured around seven shared analytical dimensions: (i) perceptions of tourism and its impacts on everyday life; (ii) positive and negative effects on the community; (iii) relationships between tourism, culture, and territory; (iv) community needs and priorities; (v) expectations regarding regenerative tourism; (vi) barriers to participation; and (vii) potential community roles in regenerative processes; the grid was operationalised through a shared reporting template, enabling partners to adapt facilitation formats to local contexts without compromising the analytical comparability of the returns
Synthesis and cross-partner comparison	The analysis unfolded in four stages: systematic review of partner returns, thematic coding of perceptions, needs, tensions, and roles, cross-territorial comparison to identify recurring patterns and context-specific divergences, and analytical synthesis into transversal categories; no quantitative scoring was applied: the analysis prioritises patterns of meaning over frequency counts, in line with qualitative research standards; territorial cross-tabulations were used as comparative visualisation devices rather than as statistical measures.
Outputs	The protocol generated three interconnected deliverables that jointly form the WP1 transnational knowledge base: D.1.2.1 (mapping of cultural and tourism actors), D.1.2.2 (analysis of cultural organisations' needs), and D.1.2.3 (analysis of local communities); these are complemented by the transnational conceptual map of challenges, resources, needs, and stakeholders who can be activated, which orients the subsequent pilot-action phase
Regenerative-action criteria	Each proposed action was assessed against the four regenerative-action models adopted by the project: Repair (restoring ecosystems, biodiversity, and built heritage); Reconnect (creating authentic connections between visitors and residents, humans and nature, and generations); Re-engage (involving stakeholders in tourism governance and civic participation); and Redistribute (supporting the equitable distribution of economic benefits, the local economy, and quality employment) – partners were asked to select at least two action models for each proposal, in order to verify its regenerative consistency and avoid treating isolated activities as regenerative by default

Tab. 3 | Methodological protocol and data, supporting the replicability of the pathway in other Mediterranean contexts (credit: Med4Regen 'Iuav' team, 2025).



Fig. 10 | Slide from an international partnership meeting on overtourism. Comparison between different local inhabitable imaginaries: the experience of 200,000 Pink Floyd visitors in 1989 and the new floating cinema organised by the Microclima association (credit: Med4Regen 'Iuav' team, 2025).

to urban space. SDG 12 (Responsible Consumption and Production) relates to the regenerative paradigm, which proposes models of use based on the quality of experience rather than its quantitative measurement.

In terms of indirect synergies, the project generates effects on SDG 4 (Quality Education) through capacity-building processes understood as social learning among universities, public partners, and community actors; on SDG 8 (Decent Work and Economic Growth) through the redistribution of tourism benefits towards local economies and the enhancement of short supply chains; and on SDG 17 (Partnerships for the Goals) through the transnational partnership of seven Mediterranean countries. Less immediate but relevant synergies concern SDG 5 and SDG 16, insofar as participatory processes include underrepresented groups and rebuild trust between communities and institutions, and SDG 13, since regenerative tourism is situated within the framework of Mediterranean climate adaptation that orients the Euro-MED programme.

The simultaneous activation of multiple Goals may nevertheless generate tensions: between economic attractiveness (SDG 8) and social inclusion (SDGs 10 and 11), which may translate into gentrification; between heritage promotion (SDG 11) and the human carrying capacity of tourist sites, which may fuel overtourism; between innovation (SDG 9) and digital equity (SDG 10); between responsible consumption (SDG 12) and short-term economic revenues (SDG 8); and between community involvement (SDGs 11 and 16) and design culture, where the absence of the latter risks reducing participation to participationism, compromising social learning (SDG 4). The regenerative scope of Med4Regen lies precisely in this dynamic balance, in which design reflexivity functions as a key competence for managing these trade-offs.

Conclusions | The first phase of Med4Regen produced three distinct but interconnected outcomes. At the theoretical and methodological level, the hyperlocal methodological framework was developed, translating the convergence between Design for Territories and regenerative tourism into an operational grid of six analytical dimensions – Heritage, Traces, Narratives, Actions, Events, and Imaginary – integrated with four models of regenerative action – Repair, Reconnect, Reactivate, and Redistribute – and into a ten-dimension self-assessment tool conceived as an agile device for researchers, designers, and local actors. At the empirical level, the research generated a transnational qualitative knowledge base on the perceptions, needs, and tensions expressed by cultural institutions and local communities in seven Mediterranean countries, returned in a comparable conceptual map while respecting territorial specificities. At the procedural level, a methodology of structured focus groups was validated as a replicable and adaptable device that proved effective for listening, co-diagnosis, and co-design among institutional, cultural, and community actors.

The outcomes achieved must be read within precise constraints, since the qualitative and interpretative structure of the research does not aspire to statistical representativeness, and the composition of the groups depends on each partner's capacity to activate its territorial networks. These considerations are accompanied by a more structural issue: the tools developed in WP1 produce comparable data, but they were not designed to generate awareness among participants and are, by their very nature, partially extractive in relation to the contexts they observe. Recognising this limit is the prerequisite for their conscious adoption in subsequent phases.

The transferability of the hyperlocal framework, conceived from the outset as a replicable methodology, can now be assessed at three levels: typological, geographical, and thematic. The self-assessment tool can be adopted by cultural institutions, administrations, and research groups across different scales and projects; the methodology, developed in Mediterranean contexts under high tourism pressure, can be extended to other European urban destinations with analogous dynamics; and the six analytical dimensions and four action models can also function as a reading matrix for non-tourism regeneration processes, from urban welfare to the enhancement of cultural commons. In all cases, transferability is not automatic and requires contextual calibration and the integration of local expertise.

WP1 of Med4Regen focused on constructing a shared vision among the consortium operators in order to provide, in WP2, a training process for museums and, in WP3, an effective transfer to policymakers. At the time of writing, several significant scientific questions remain open: the development of qualitative and relational indicators capable of establishing regenerative impact beyond conventional economic metrics; the construction of methodologies able to assess over time the transformations induced in urban fabrics; the elaboration of more effective strategies for involving marginal groups; and the further examination of the relationship between the hyperlocal approach and public decision-making processes, especially where culture and tourism fall under separate administrative sectors.

On this scientific and operational ground, a broader reflection emerges concerning the posture of the designer within regenerative tourism processes and the design culture required to support them. Addressing this issue is essential in order to avoid slipping into the two misunderstandings already identified by Manzini (2016): on the one hand, the reduction of design to an efficient sequence of technical solutions (solutionism); on the other, the dissolution of the designer into a merely facilitative figure, only apparently neutral, who collects contributions without bringing design culture, visions, and quality criteria.

Both risks are present in regenerative tourism processes: the first arises when the toolkit is confused with regeneration itself; the second arises when the community is convened without the designer constructing with it a shared ground of themes, perspectives, and possibilities for action. Here, the concept of 'design reflexivity' developed by Smit, Melissen, and Font (2024) becomes operationally central. The three authors identify three mechanisms of reflexivity that must run through every co-design process for tourism systems: problem definition, method definition, and stakeholder definition. Within this framework, reflexivity is not an innate quality of the designer but a competence that is constructed methodologically and must be practised in order to become part of the designer's procedural repertoire.

This brings us back to the epistemological root of Design for Territories. Parente (2016) describes the disciplinary approach as grounded in situated knowledge (Lave and Wenger, 1990) and reflective practice (Schön, 1993). Fagnoni (2021) argues that the designer works beyond problem-solving, studying and offering opportunities through the design of product-service systems for the territory, the city, and culture; for citizens, and with citizens. This means that the participatory process is not a mere support to the project, but the construction of the collective capacities to which Dredge (2022) refers when describing regenerative tourism as a change in mindsets.



Fig. 11 | The M9 Museum and its district in Mestre. M9 is one of the eight associated partners of Med4Regen implementing regenerative tourism pilot actions: these initiatives are designed to connect local communities, associations, cultural institutions, and visitors through locally grounded narratives developed through hyperlocal research (credit: Museo M9, A. Chemollo, 2017).

Fagnoni (2021) further observes that much design activity focuses on promoting the search for meaning and awareness, rather than pursuing the efficiency of the product-service as an end in itself. The integrated model adopted by Med4Regen, composed of three components – the hyperlocal framework, the self-assessment tool, and the focus-group methodology – proves useful insofar as it supports the search for regenerative possibilities and produces comparable data; however, these data remain, by their very nature, 'extractive' unless they are explicitly reoriented towards generating awareness among participants.

The designer who emerges from this theoretical convergence is neither a simple facilitator, nor an executive technician, nor a neutral observer; rather, the designer is a reflexive professional who brings a design culture into play, engages it dialogically with the cultures of other actors, methodologically constructs reflexivity in relation to mechanisms of problem, method, and stakeholder definition, and orients the entire process not only towards the efficiency of the solution but also towards the growth of collective awareness. In this sense, the issue is not merely technical but concerns, above all, the design posture; it requires designers capable of inhabiting the uncertainty of the process without resolving it prematurely, keeping open the tension between what the territory is and what it may become, and returning this tension to communities as a generative resource rather than as a problem to be closed.

Acknowledgements

The research presented here reports the preliminary results of Work Package 1 of the Med4Regen project (Interreg Euro-MED 2025–2027), for which the Veneto Region acts as Lead Partner and Università 'Iuav' di Venezia as WP1 leader. The project moved into Work Package 2 at the end of April 2026; this contribution therefore presents the outcomes of its first methodological phase. The Authors would like to thank the Lead Partner, all project partners and associated partners of the Med4Regen project. The Authors would also like to thank M. Tognon, S. M. Carolo, P. Carlucci and the collaborators who contributed to this research, especially D. D'Avanzo, who contributed to data analysis and the review process.

The paper is the result of a shared reflection among the Authors. The introductory section was written jointly by all the Authors; the sections 'Theoretical and methodological framework' and 'Hyperlocal framework and research for regenerative actions' are attributable to M. Ciaramitaro; 'The state of the art in the international debate' and 'Methodological protocol and replicability' are attributable to A. Bosco; 'Objectives of the first phase of Med4Regen' is attributable to G. Pavlov; 'Contribution to the Sustainable Development Goals', 'Limits and openings', and 'Conclusions' are attributable to E. Bonini Lessing.

Note

1) For further information on the definition of 'museum', see the webpage: icom-italia.org/definizione-di-museo/ [Accessed 30 March 2026].

References

Battaglini, E. (2024), *Innovazione territoriale – Metodi, tecniche di progettazione, casi di studio*, Carocci Editore, Roma.

Bellato, L. and Pollock, A. (2025), "Regenerative tourism – A state-of-the-art review", in *Tourism Geographies | An International Journal of Tourism Space, Place and Environment*, vol. 27, issue 3-4, pp. 558-567. [Online] Available at: doi.org/10.1080/14616688.2023.2294366 [Accessed 30 March 2026].

Bertocchi, D., Camatti, N., Giove, S. and van Der Borg, J. (2020), "Venice and overtourism – Simulating sustainable

development scenarios through a tourism carrying capacity model", in *Sustainability*, vol. 12, issue 2, article 512, pp. 1-15. [Online] Available at: doi.org/10.3390/su12020512 [Accessed 30 March 2026].

Brignoni, M., Dall'Osso, G., Gasparotto, S. and Varini, R. (2023), "Mappatura dei processi design-driven per la rigenerazione delle piccole città fortificate in aree interne | Mapping design-driven processes for the regeneration of small fortified towns in inland areas", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 13, pp. 281-290. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/13242023 [Accessed 30 March 2026].

Bosco, A., Bonini Lessing, E. and Parente, M. (2025), "Patrimoni come risorse generative – Processi e prospettive nella ricerca di design", in *Design e ricerca – Fonti e Risorse – Atti della Conferenza annuale SID – Società Italiana di Design, 4-5 luglio 2024, Università Iuav di Venezia*, pp. 614-620. [Online] Available at: societaitalianadesign.it/wp-content/uploads/2025/11/Design-e-Ricerca-Atti-di-convegno.pdf [Accessed 30 March 2026].

Calvino, I. (1995), "Venezia – Archetipo e utopia della città acquatica", in Barenghi, M (ed.), *Saggi (1945-1985)*, Mondadori, Milano, pp. 2688-2692.

Camrass, K. (2020), "Regenerative futures", in *Foresight | The journal of future studies, strategic thinking and policy*, vol. 22, issue 4, pp. 401-415. [Online] Available at: doi.org/10.1108/FS-08-2019-0079 [Accessed 30 March 2026].

Cardini, P. (2022), "Endogenesis", in *diid | Disegno Industriale – Industrial Design*, issue 76, pp. 6-17. [Online] Available at: doi.org/10.30682/diid7622a [Accessed 30 March 2026].

Casarotto, L. and Oddone, M. (2024), "Identità territoriale scalabile – Progettare la comunicazione della complessità | Scalable territorial identity – Designing the communication of complexity", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 16, pp. 324-333. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/16272024 [Accessed 30 March 2026].

Cimadomo, G., Lecardane, R. and Torregrossa, P. M. (2025), "Agenda 2030 per un turismo sostenibile – Il Cammino di Santiago de Compostela e la Trasversale Sicula | 2030 Agenda for sustainable tourism – The Way of Santiago de Compostela and the Ancient Trasversale Sicula", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 17, pp. 80-93. [Online] Available at: doi.org/10.69143/2464-9309/1742025 [Accessed 30 March 2026].

Cocola-Gant, A. (2018), "Tourism gentrification", in Lees, L. and Phillips, M. (eds), *Handbook of Gentrification Studies*, Edward Elgar Publishing, Cheltenham, pp. 281-293. [Online] Available at: doi.org/10.4337/9781785361746.00028 [Accessed 30 March 2026].

Cruz, F., Rocha, F. and Rodrigues, C. (2025), "A study on research methods in design and territory", in Assoreira Almendra, R. (ed.), *Proximity in Design Research – People, Processes, Products, Philosophy*, Routledge, Abingdon, pp. 225-235. [Online] Available at: doi.org/10.4324/9781003509653-23 [Accessed 30 March 2026].

Davis, R. C. (2022), *Il giocattolo del mondo – Venezia nell'epoca dell'iperturismo*, Wetlands, Venezia.

Dredge, D. (2022), "Regenerative tourism – Transforming mindsets, systems and practices", in *Journal of Tourism Futures*, vol. 8, issue 3, pp. 269-281. [Online] Available at: doi.org/10.1108/JTF-01-2022-0015 [Accessed 30 March 2026].

Fagnoni, R. (2022), "Design in allerta", in *MD Journal*, vol. 14, issue 2, pp. 12-23. [Online] Available at: mdj.materialdesign.it/index.php/mdj/article/view/261 [Accessed 30 March 2026].

Fagnoni, R. (2021), "Dal possesso all'uso – Oltre il binomio prodotto / servizio", in Casarotto, L., Fagnoni, R. and Sinni, G. (eds), *Dialoghi oltre il Visibile – Il design dei servizi per il territorio e i cittadini*, Ronzani Editore, Vicenza, pp. 71-84.

Fagnoni, R. (2018), "Da ex a next", in *MD Journal*, vol. 5, issue 1, pp. 16-27. [Online] Available at: mdj.materialdesign.it/index.php/mdj/article/view/113 [Accessed 30 March 2026].

Kavaratzis, M., Warnaby, G. and Ashworth, G. J. (eds) (2015), *Rethinking Place Branding – Comprehensive Brand Development for Cities and Regions*, Springer, Cham. [Online] Available at: doi.org/10.1007/978-3-319-12424-7 [Accessed 30 March 2026].

Lave, J. and Wenger, E. (1990), *Situated Learning – Legitimate Peripheral Participation*, Cambridge University Press, Cambridge.

Mang, P. and Reed, B. (2012), "Designing from place – A regenerative framework and methodology", in *Building Research and Information*, vol. 40, issue 1, pp. 23-38. [Online] Available at: doi.org/10.1080/09613218.2012.621341 [Accessed 30 March 2026].

Manzini, E. (2018), *Politiche del quotidiano – Progetti di vita che cambiano il mondo*, Edizioni di Comunità, Roma.

Manzini, E. (2016), "Design Culture and Dialogic Design", in *Design Issues*, vol. 32, issue 1, pp. 52-59. [Online] Available at: doi.org/10.1162/DESI_a_00364 [Accessed 30 March 2026].

Manzini, E. (2010), "Small, local, open, and connected – Design for social innovation and sustainability", in *The Journal of Design Strategies*, vol. 4, issue 1, pp. 8-11. [Online] Available at: issuu.com/journalofdesignstrategies/docs/the_journal_of_design_strategies_vo_3d28703899b84f [Accessed 30 March 2026].

Muratovski, G. (2022), *Research for Designers – A guide to methods and practice*, SAGE Publications, London.

Parente, M. (2016), "Design for Territories as reflective practice", in *PAD | Pages on Art and Design*, vol. 13, pp. 10-27. [Online] Available at: padjournal.net/wp-content/uploads/2024/01/PAD13.pdf [Accessed 30 March 2026].

Parente, M., Lupo, E. and Sedini, C. (2018), "Design Approaches and Methodologies for the Valorization of Places – Experiences from the Western Mediterranean Area", in *PAD | Pages on Art and Design*, vol. 14, pp. 61-84. [Online] Available at: padjournal.net/wp-content/uploads/2023/01/1405-PAD-OK-PARENTE-LUPO-SEDINI.pdf [Accessed 30 March 2026].

Parente, M. and Sedini, C. (2017), "Design for Territories as Practice and Theoretical Field of Study", in *The Design Journal | An International Journal for All Aspects of Design*, vol. 20, issue supp. 1, pp. S3047-S3058. [Online] Available at: doi.org/10.1080/14606925.2017.1352812 [Accessed 30 March 2026].

Pereno, A. and Barbero, S. (2020), "Systemic design for territorial enhancement – An overview on design tools supporting sociotechnical system innovation", in *Strategic Design Research Journal*, vol. 13, issue 2, pp. 113-136. [Online] Available at: doi.org/10.4013/sdrj.2020.132.02 [Accessed 30 March 2026].

Ricci, L., Poli, I. and Marino, M. (2025), "Welfare urbano e rigenerazione – Sostenibilità e inclusione sociale per il raggiungimento degli SDG | Urban welfare and regeneration – Sustainability and social inclusion for achieving the SDGs", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 17, pp. 94-107. [Online] Available at: doi.org/10.69143/2464-9309/1752025 [Accessed 30 March 2026].

Rosmino, A. (2024), "Corpi, menti e design – Un approccio integrato per l'innovazione museale | Bodies, minds, and design – An integrated approach to museum innovation", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 16, pp. 278-289. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/16232024 [Accessed 30 March 2026].

Schön, D. A. (1993), *Il professionista riflessivo – Per una nuova epistemologia della pratica professionale*, Edizioni Dedalo, Bari.

Sheehan, N. W. (2011), "Indigenous Knowledge and Respectful Design – An evidence-based approach", in *Design Issues*, vol. 27, issue 4, pp. 68-80. [Online] Available at: doi.org/10.1162/DESI_a_00106 [Accessed 30 March 2026].

Smit, B., Melissen, F. and Font, X. (2024), "Co-designing tourism experience systems – A living lab experiment in reflexivity", in *Journal of Destination Marketing & Management*, vol. 31, article 100858, pp. 1-10. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.jdmm.2024.100858 [Accessed 30 March 2026].

Sposito, C. and De Giovanni, G. (2023), "Affrontare la complessità – Integrare LCA, ERA ed ESA per valutare impatti e benefici antropici sulla biosfera | Dealing with complexity – Integrating LCA, ERA and ESA to assess human impacts and benefits on the biosphere", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 14, pp. 12-39. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/1412023 [Accessed 30 March 2026].

Tamborrini, P. (2019), "Design e Territorio – Un modello di innovazione per la sostenibilità e l'imprenditorialità", in Russo, D. and Tamborrini, P. (eds), *D&T – Design e Territori*, Palermo University Press, Palermo, pp. 25-33. [Online] Available at: doi.org/11583/2897394 [Accessed 30 March 2026].

Trocchianesi, R. (2012), "From the Place Identity to Scenarios for the Valorisation of the Territory – Design as an Interpreter of New Vocations and Languages to the Fruition", in *Strategic Design Research Journal*, vol. 5, issue 3, pp. 129-135. [Online] Available at: doi.org/10.4013/sdrj.2012.53.05 [Accessed 30 March 2026].

UN – United Nations (2015), *Transforming our World – The 2030 Agenda for Sustainable Development*. [Online] Available at: sdgs.un.org/2030agenda [Accessed 30 March 2026].

Villani, T., Romagna, G. and Oddi, A. (2024), "Ottimizzare la fruibilità nei musei – Gestione integrata di dati sui modi d'uso dello spazio e dei contenuti culturali | Optimising usability in museums – Integrated management of data on the use of space and cultural content", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 16, pp. 220-231. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/16192024 [Accessed 30 March 2026].

Villari, B. (2024), "Generative City and Generative Communities", in Galluzzo, L. and Zurlo, F. (eds), *Designing Proximity – Reflections on Future Cities*, Springer, Cham, pp. 1-12. [Online] Available at: doi.org/10.1007/978-3-031-60145-3_1 [Accessed 30 March 2026].

Villari, B. (2021), "Community-centered Design – A Design Perspective on Innovation in and For Places", in *The International Journal of Design in Society*, vol. 16, issue 1, pp. 47-58. [Online] Available at: doi.org/10.18848/2325-1328/cgp/v16i01/47-58 [Accessed 30 March 2026].

Villari, B. (2012), *Design per il territorio – Un approccio community centred*, FrancoAngeli, Milano.

Zanardi, C. (2020), "Se il diritto è a una città svuotata – Venezia nel deserto della monocoltura turistica", in *Crítica Urbana | Revista de Estudios Urbanos y Territoriales*, vol. 3, issue 13, pp. 31-26. [Online] Available at: criticaurbana.com/wp-content/uploads/2020/07/Cr%C3%ADtica-Urbana-13.-Clara-Zanardi.pdf [Accessed 30 March 2026].

AGATHÓN – International Journal of Architecture, Art and Design | n. 19 | 2026 | pp. 416-431
ISSN print: 2464-9309 – ISSN online: 2532-683X | doi.org/10.69143/2464-9309/19242026

Article Info

Received 11 March 2026
Revised 19 April 2026
Accepted 24 April 2026
Published 30 June 2026

VALORIZZAZIONE DI MATERIALI RESIDUI NELLE FILIERE PRODUTTIVE AGRO-INDUSTRIALI
Transizioni circolari in Alto Adige (Italia)

VALORISATION OF RESIDUAL MATERIALS IN AGRO-INDUSTRIAL PRODUCTION CHAINS
Circular transitions in South Tyrol (Italy)

Camilo Ayala-Garcia, Noa Ruth Paul, Laura Bordini,
Mila Stepanovic, Nitzan Cohen

Abstract

Nelle regioni alpine come l'Alto Adige le attività agro-industriali e agricole producono grandi quantità di sottoprodotti i cui usi attuali risultano spesso inferiori al loro potenziale come risorse materiali secondarie. La collaborazione tra design, scienza e tecnologia promuove l'innovazione sostenibile dei materiali, e tale approccio interdisciplinare costituisce il fondamento della presente ricerca. Lo studio esamina quattro sottoprodotti provenienti dai settori lattiero-caseario, birrario, della distillazione della frutta e dell'allevamento ovino della regione, combinando prospettive materiali, tecnologiche e sistemiche. I risultati preliminari individuano percorsi concreti per reintegrare tali risorse sottoutilizzate nelle filiere produttive locali, facendo emergere i vincoli normativi, infrastrutturali ed economici che attualmente ne limitano la valorizzazione.

In Alpine regions such as South Tyrol, agro-industrial and agricultural activities generate large quantities of by-products whose current uses often fall short of their potential as secondary material resources. Collaboration between design, science, and technology promotes sustainable material innovation, and this interdisciplinary approach forms the basis of the present research. The study examines four by-products from the region's dairy, brewing, fruit-distillation, and sheep-farming sectors, combining material, technological, and systemic perspectives. The preliminary findings identify concrete pathways for reintegrating these underused resources into local production chains, while also highlighting the regulatory, infrastructural, and economic constraints that currently limit their valorisation.

Keywords

sottoprodotti agro-industriali, valorizzazione degli scarti, design guidato dai materiali, design sistemico, economia circolare

agro-industrial by-products, waste valorisation, material-driven design, systemic design, circular economy

Camilo Ayala-Garcia, Designer and PhD, is an Assistant Professor at the Faculty of Design and Art, Free University of Bozen-Bolzano (Italy). His current research connects emerging technologies and materialities towards transitional circularity, with a strong focus on tools that foster knowledge sharing. E-mail: camilo.ayalagarcia@unibz.it

Noa Ruth Paul, Designer and Research Fellow at the Faculty of Design and Art, Free University of Bozen-Bolzano (Italy). She is an industrial designer specialising in ecological materials and sustainable innovation. E-mail: noaruth.paul@unibz.it

Laura Bordini, Designer and Research Fellow at the Faculty of Design and Art, Free University of Bozen-Bolzano (Italy). Her areas of interest include materials, bio-design, and practices related to environmental and social sustainability. E-mail: laura.bordini@unibz.it

Mila Stepanovic, Designer and PhD, is an Assistant Professor at the Faculty of Design and Art, Free University of Bozen-Bolzano (Italy). Her research interests lie in product design, futuring practices, and technological artefacts. E-mail: mila.stepanovic@unibz.it

Nitzan Cohen is a Designer and Full Professor at the Faculty of Design and Art, Free University of Bozen-Bolzano (Italy). He founded the 'Design Friction Lab', which is currently active in the development of 'growing materials', the future of open-source production, and sustainable nanoelectronics. E-mail: nitzan.cohen@unibz.it



L'evidente crisi ambientale richiede risposte sistemiche rapide per ridurre l'impatto della produzione industrializzata (IRP, 2019; Ulluwishewa, 2014). In linea con gli Obiettivi di Sviluppo Sostenibile (SDG; UN, 2015, 2022) i sistemi produttivi e agricoli devono essere ripensati per minimizzare i danni ambientali, generando al contempo valore sociale ed economico (EMF, 2025). All'interno di questa transizione il design riconosce i materiali e la loro gestione come opportunità critiche per una produzione e un consumo sostenibili (Vezzoli and Manzini, 2018): un tempo considerati secondari nel processo di progettazione assumono oggi un ruolo centrale (Karana et alii, 2015; Rognoli et alii, 2015) per abilitare la transizione ecologica.

A differenza dello sviluppo tradizionale dei materiali, orientato alle prestazioni o all'ottimizzazione per il mercato, il design esplora oggi alternative speculative e sistemiche in risposta alle sfide contemporanee. Nell'ultimo decennio gli approcci guidati dal design hanno trasformato le risorse materiali attraverso la collaborazione interdisciplinare (Barbero and Ferrulli, 2023; Rognoli and Ayala-Garcia, 2021): sempre più spesso l'innovazione dei materiali non nasce esclusivamente dalla scienza dei materiali, ma da collaborazioni tra designer, ingegneri, biologi, artigiani e agricoltori (D'Olivo and Karana, 2021), attraverso un approccio multidisciplinare che configura come un nuovo paradigma.

Le tecnologie ad accesso aperto (Hofer, Hassan and Mies, 2024; Gershenfeld, 2012), i sistemi produttivi democratizzati (Bettiol and Micelli, 2014; Tanenbaum et alii, 2013) e il rinnovato interesse per le pratiche artigianali (Jakob and Thomas, 2017; Sennett, 2008) rendono possibili modelli industriali alternativi (Geissdoerfer et alii, 2020; Anderson, 2012). Il raggiungimento della circolarità richiede in ultima analisi il riconoscimento del valore insito in tutte le risorse coinvolte nei processi industriali e agro-industriali (Manzini and Vezzoli, 2003).

L'Alto Adige è caratterizzato da consolidate tradizioni artigianali (Alexander, 2006) e da un settore agricolo e manifatturiero ben sviluppato: nel biennio 2019-2020 la superficie coltivata agro-industriale copriva 204.085 ettari e il settore manifatturiero rappresentava il 30,8% dell'economia regionale (ASTAT, 2025). Dato il volume di risorse che attraversano questi settori comprendere come i materiali e i sottoprodotti vengano processati, trasformati e scartati è essenziale per uno sviluppo regionale sostenibile.

Con una popolazione relativamente ridotta (504.643 abitanti nel 2024; ASTAT, 2025) e una struttura di governance autonoma, l'Alto Adige offre un ecosistema compatto e interconnesso, adatto alla sperimentazione sistemica. Le strette relazioni tra agricoltori, industria, istituzioni di ricerca e autorità pubbliche facilitano una mappatura approfondita dei sottoprodotti regionali, mentre la coesistenza tra un'agricoltura autosufficiente d'alta quota e uno sviluppo industriale di fondovalle (Schneider, 2022) offre ulteriori conoscenze sulle strategie diversificate di gestione delle risorse. Allo stesso tempo la forte interrelazione tra agricoltura e turismo esercita pressione sui sistemi locali di gestione dei rifiuti (Fischer, 2019), generando sfide e opportunità per l'innovazione circolare. Le iniziative di collaborazione che riuniscono agricoltori, designer e ricercatori rafforzano ulteriormente questo potenziale trasformativo (Gaddi and Mastrolonardo, 2024) e sono supportate anche dalle politiche regionali. Il Piano d'Azione provinciale richiede esplicitamente un cambiamento nei modelli di produzione e di consumo[1] in linea con la visione dei sistemi 'piccoli, locali, aperti e connessi' (Manzini, 2015), tutte condizioni che creano un ambiente favorevole alla sperimentazione di cicli di vita alternativi dei materiali. Attualmente il riciclo rappresenta il 29% dei rifiuti totali, mentre il 44% viene incenerito e il 4% conferito in discarica (ASTAT, 2025; Fig. 1).

Sebbene i tassi di riciclo siano relativamente elevati, l'incenerimento resta prevalente e anche il riciclo comporta costi ambientali. Circa 40.000 tonnellate di rifiuti organici vengono processate ogni anno tramite compostaggio o produzione di biometano (Provincia Autonoma di Bolzano, 2024) e fino a un terzo delle risorse alimentari grezze viene perso durante la lavorazione industriale, il che rivela un significativo potenziale di valorizzazione ancora inespresso. L'agricoltura industrializzata dell'Alto Adige, le infrastrutture avanzate di trattamento dei rifiuti e l'elevata sensibilità ambientale offrono quindi condizioni ideali per indagare in che modo i sottoprodotti industriali e agro-industriali possano essere reintegrati nei sistemi produttivi circolari.

Un ulteriore fattore motivante è la Legge n. 166/2016 (Presidente della Repubblica Italiana, 2016), che promuove la riduzione degli sprechi in tutte le fasi di produzione, lavorazione e distribuzione, finalizzata a limitare gli impatti ambientali, ridurre la produzione di rifiuti ed estendere il ciclo di vita dei prodotti attraverso il riuso e il riciclo: questo quadro normativo supporta sia l'implementazione sia la potenziale scalabilità del progetto a livello regionale e nazionale.

A partire da tale contesto il presente contributo illustra i primi esiti di una ricerca in corso, finanziata dalla Provincia Autonoma di Bolzano al Consorzio MICST, finalizzata a individuare risorse regionali sottoutilizzate e integrarle nelle filiere esistenti o, in loro assenza, a sviluppare nuovi percorsi di valorizzazione (Santos Malaguti de Sousa et alii, 2023). In risposta alla forte specializzazione agricola dell'Alto Adige la ricerca indaga scarti e sottoprodotti agroalimentari attraverso processi di tecnologia alimentare, dalla fermentazione a trattamenti avanzati dei materiali, per promuovere sistemi produttivi circolari e rigenerativi. La ricerca propone inoltre una metodologia interdisciplinare per lo sviluppo di un quadro analitico basato sul materiale, sulla tecnologia e sull'approccio sistemico, volta a supportare la valorizzazione e la trasformazione delle risorse regionali, in particolare dei residui alimentari e agricoli (Morpurgo, 2024; Bofylatos, 2022; Bak-Andersen, 2021).

Lo studio, focalizzato su quattro sottoprodotti, mostra come il framework possa essere applicato in contesti industriali reali: la lana, le trebbie esauste di birra, i noccioli di albicocca e il siero di latte sono stati individuati attraverso attività di ricerca sul campo condotte in collaborazione con industrie e stakeholder locali. Il contributo è strutturato in sezioni: dopo aver delineato i metodi di ricerca e il processo interdisciplinare che ha portato allo sviluppo del framework, l'articolo presenta i quattro sottoprodotti per illustrarne il potenziale nella generazione di nuovi materiali, prodotti e forme più ampie di valore sostenibile a livello regionale.

Metododologia e fasi | Questo studio ha adottato un approccio di ricerca esplorativo guidato dal design, finalizzato a identificare, mappare e valutare il potenziale di valorizzazione dei sottoprodotti agroindustriali in Alto Adige, attraverso un quadro sistemico interdisciplinare (Klein, 1990) e radicato nel territorio (Barbero and Ferrulli, 2023). Il Consorzio MICST possiede competenze in design, food technology[2], fermentazione[3], antropologia e gestione locale dei rifiuti[4], che consentono un'ampia analisi delle dimensioni materiali, tecnologiche e sistemiche (Olivastri and Tagliasco, 2024) dei prodotti locali.

La ricerca è stata sviluppata in cinque fasi. Nella prima fase il sistema produttivo regionale è stato analizzato attraverso la mappatura dei sottoprodotti industriali e agroalimentari e delle principali infrastrutture di gestione dei rifiuti; sono state effettuate visite preliminari a discariche, impianti di incenerimento, sistemi di recupero energetico e centri di digestione anaerobica, in collaborazione con l'Autorità regionale competente, al fine di comprendere come la struttura di governance autonoma dell'Alto Adige influenzi la gestione, il recupero e lo smaltimento dei rifiuti.

Nella seconda fase la ricerca ha combinato revisione della letteratura, casi studio (Boblin et alii, 2013) e classificazione tassonomica (Bailey, 1994) per categorizzare i sottoprodotti in base alle caratteristiche materiali, agli usi attuali e alle possibili applicazioni alternative. Questa fase ha inoltre previsto un confronto con casi di riferimento internazionali (Tab. 1) e considerato la rilevanza delle conoscenze locali possedute da agricoltori e produttori nei contesti montani (Cole and Wolf, 1999; Schneider, 2022).

Nella terza fase la ricerca è stata condotta attraverso il coinvolgimento degli stakeholder e l'indagine sul campo (Driscoll, 2011; Massari et alii, 2025). La collaborazione con la Camera di Commercio regionale ha reso disponibile un registro di aziende, cooperative e associazioni, consentendo la mappatura dei settori rilevanti e delle reti di impianti locali (Fig. 2). La selezione dei casi ha seguito una logica intenzionale privilegiando attori con elevata capacità produttiva, produzione regolare di sottoprodotti, rilevanza territoriale e accessibilità per la ricerca, relativamente alla produzione di vino, succo di mela, distillati, prodotti lattiero-caseari, produzione di carne e pascolo ovino e bovino. Su questa base sono state contattate 72 aziende tramite un protocollo e-mail standardizzato, chiedendo informazioni sull'esistenza di sottoprodotti sottoutilizzati, la quantità prodotta e le relative modalità di gestione.

Alle 25 aziende che hanno risposto alla mail (34,7%) sono stati distribuiti questionari strutturati, al fine di raccogliere dati comparabili su tipologia di sottoprodotto, quantità approssimative, continuità di produzione, modalità di trattamento o smaltimento, costo o valore economico percepito e possibile trasferimento a industrie secondarie (Fig. 3). Successivamente sono state condotte 12 visite presso le aziende e gli impianti selezionati, privilegiando i casi con elevati volumi residui, rilevanza settoriale e potenziale sperimentale (Fig. 4). Le visite hanno seguito un protocollo comune volto a documentare i processi produttivi, identificare i sottoprodotti visibili e meno visibili, chiarire le pratiche di stoccaggio e trasferimento e stabilire relazioni di fiducia con gli stakeholder: le evidenze sono state sintetizzate in diagrammi di flusso e schede comparative dei sottoprodotti (Fig. 5). Nella quarta fase sono stati selezionati i sottoprodotti della lana,

delle trebbie di birra, i noccioli di albicocca e il siero di latte per uno studio approfondito attraverso criteri di rilevanza territoriale, sottoutilizzo attuale o onere di smaltimento, potenziale materiale oppure biochimico, accessibilità per indagini sul campo e in laboratorio, rappresentatività rispetto alle filiere agro-industriali e disponibilità di aziende ed associazioni a collaborare. La sperimentazione materiale è guidata da approcci quali quelli del 'material-driven design' (Karana et alii, 2015), 'material tinkering' (Parisi, Rognoli and Sonneveld, 2017) e da metodi di selezione dei materiali basati su analisi, sintesi e similitudine (Ashby and Johnson, 2014), mentre approcci di co-design (Zamenopoulos and Alexiou, 2018) hanno supportato lo sviluppo di un prototipo semplificato. Dopo la raccolta dei dati primari e la condivisione di un documento esplicativo i risultati sono stati discussi in un incontro congiunto con i partner, al fine di definire le fasi successive della ricerca e allineare i percorsi di riutilizzo specifici per ciascuna competenza (Fig. 6).

Nella quinta fase i sottoprodotti selezionati sono stati analizzati attraverso il quadro MICST (Fig. 7), strutturato in tre macroaree interconnesse di analisi dei rifiuti industriali, studi sui sottoprodotti agroalimentari e co-design / design per la sostenibilità; ciascun sottoprodotto è stato poi valutato attraverso le lenti del materiale, della tecnologia e della relazione sistemica: la lente materiale ha considerato proprietà fisiche, compositive, sensoriali o funzionali e le possibili applicazioni; la lente tecnologica ha esaminato i requisiti di pretrattamento, la fattibilità dei processi e i vincoli infrastrutturali; la lente sistemica ha affrontato le reti di attori, la logistica, la regolamentazione, la sostenibilità economica e le opportunità di integrazione nelle filiere locali.

I quattro casi sono stati valutati in base ai parametri di quantità e continuità di generazione degli scarti di lavorazione, destinazione attuale, livello di sottoutilizzo, vincoli normativi, lavorabilità, compatibilità con le infrastrutture e potenziale di circolarità locale. Parallelamente le filiere agroalimentari e le reti di impianti locali sono state esaminate secondo i fattori politico, economico, tecnologico, sociale, giuridico-normativo e ambientale (Mallik, 2025), al fine di identificare barriere, implicazioni e opportunità nella produzione, gestione, distribuzione e trasformazione delle risorse residue. Così strutturato il quadro analitico supporta lo sviluppo e la valutazione di soluzioni sostenibili a lungo termine calibrate sul contesto e può essere replicato al di fuori dell'Alto Adige.

Lo studio ha carattere esplorativo e va letto come prototipo semplificato ma strutturato, anziché come una valutazione comparativa pienamente standardizzata, poiché l'accesso ai casi è dipeso dalla disponibilità delle aziende a collaborare e i quattro sottoprodotti selezionati non presentano lo stesso grado di maturità sperimentale. Ciononostante la procedura è riproducibile attraverso la stessa sequenza: mappatura, revisione dei casi di riferimento, selezione intenzionale dei casi, questionario, protocollo di visita sul campo, criteri di selezione dei sottoprodotti e valutazione multi-lente.

Primi esiti della ricerca su quattro prodotti | A partire dalla mappatura, dal coinvolgimento degli stakeholder e dall'analisi multilente i primi risultati della ricerca riguardano la valutazione dei quattro sottoprodotti agro-industriali selezionati. Piuttosto che offrire soluzioni definitive i risultati illustrano i percorsi di valorizzazione emergenti, i vincoli chiave e le opportunità specifiche per il contesto, attraverso le lenti materiale, tecnologia e relazione sistemica: i risultati vanno intesi come indicazioni fondate sul potenziale di integrazione delle risorse sottoutilizzate nei sistemi produttivi circolari regionali.

Per la lana, la ricerca ha evidenziato che ogni anno restano inutilizzate circa 90 tonnellate di prodotto sudtirolese, in quanto viene prevalentemente scartata dagli allevatori o raccolta dalle cooperative senza una destinazione predefinita, mentre solo 10 tonnellate vengono utilizzate, principalmente per prodotti artigianali tradizionali su piccola scala. Sebbene sia riconosciuta a livello internazionale come parte del Patrimonio culturale alpino, la lana locale ha applicazioni contemporanee limitate a causa delle sue fibre grossolane e robuste (Fig. 8), che ne restringono le possibilità di impiego poiché non può competere con fibre più fini come il merino (Fig. 9), che domina il mercato dell'abbigliamento.

Le richieste del mercato fanno sì che la lana locale non abbia praticamente alcun valore per gli allevatori che già affrontano difficoltà economiche. Le pecore devono essere tosate regolarmente, di norma due volte l'anno, ma l'inadeguata valorizzazione della lana porta al suo accumulo, creando un onere ambientale; inoltre la lana grezza è classifi-

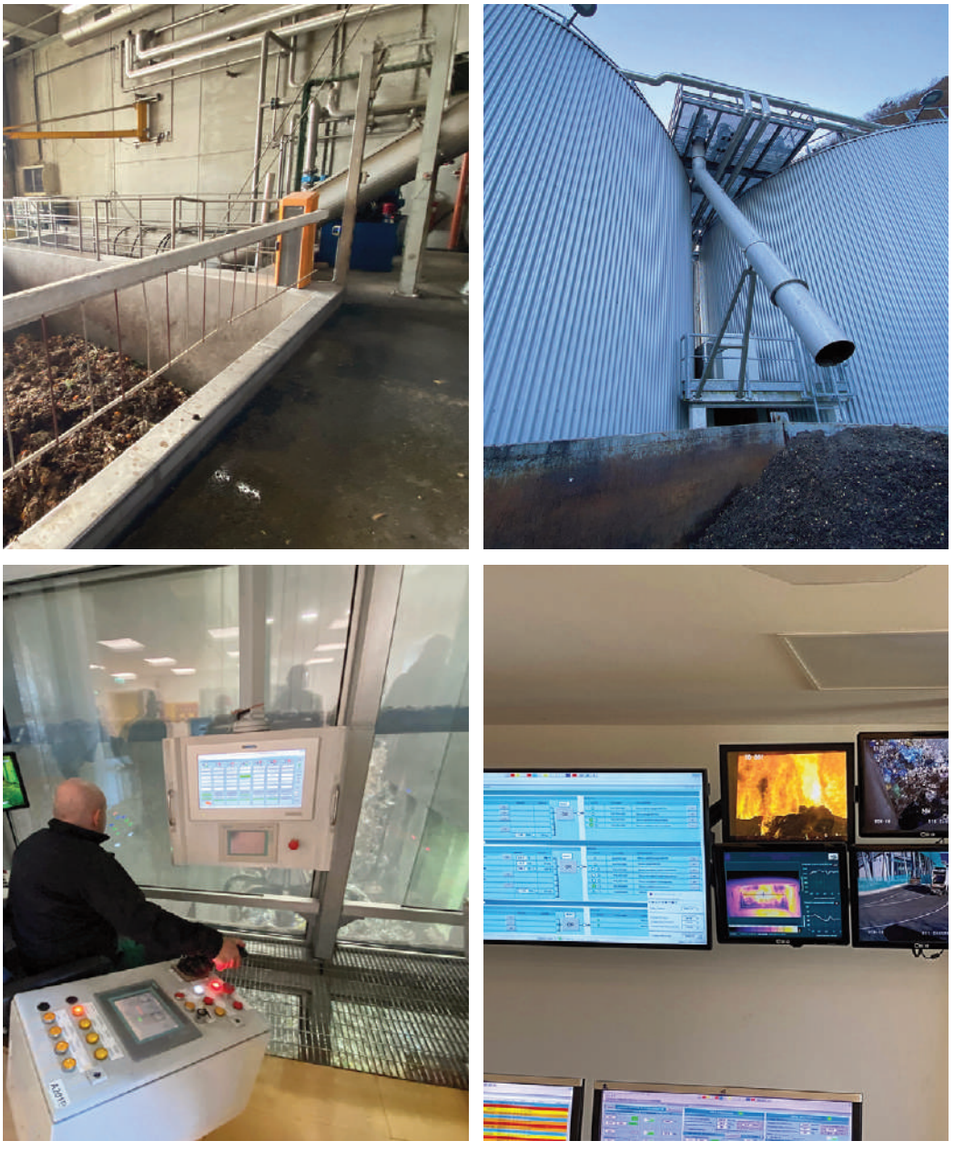


Fig. 1 | Biomethane and waste-to-energy plants (credits: Design Friction Lab, 2024).

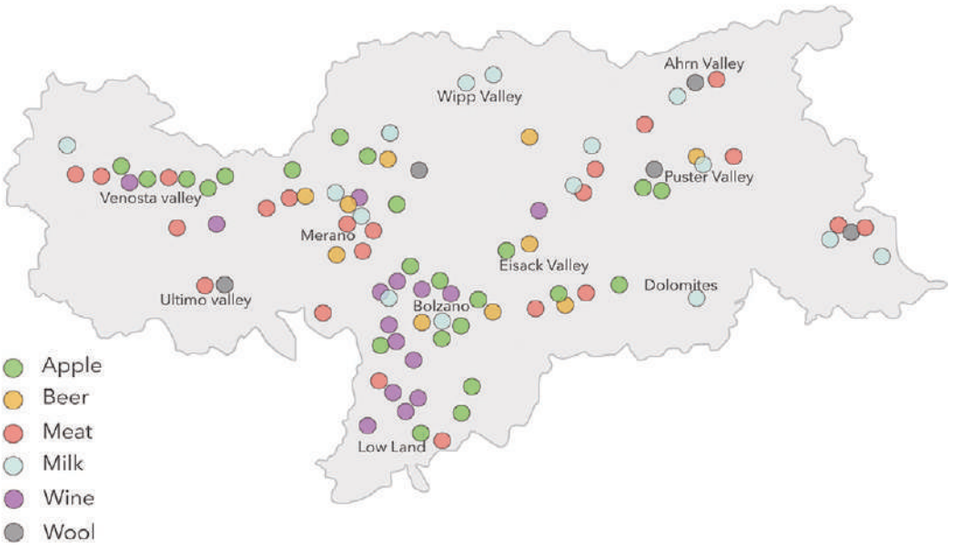


Fig. 2 | Map of local stakeholders in the agro-industrial sectors identified (credit: Design Friction Lab, 2024).

cata come sottoprodotto animale di 'categoria 3' e deve essere gestita secondo il Regolamento (EC) n. 1069/2009 (European Parliament and Council of the European Union, 2009), che prevede procedure specifiche per la lavorazione, il trasporto e lo smaltimento. Questa sfida non è esclusiva dell'Alto Adige ma si riscontra in numerose regioni europee e affrontarla richiede pertanto un approccio contestualizzato che risponda alle condizioni, alle risorse e alle capacità locali; allo stesso tempo indicazioni preziose possono essere acquisite da strategie e innovazioni già implementate in altre regioni che affrontano simili problemi (Gaddi and Mastrolonardo, 2024; Knapp, 2022).

Sul piano delle proprietà materiali e delle possibili applicazioni la collaborazione con attori locali del tessile e del design ha rivelato molteplici opportunità di rivalorizzazione. Sebbene la fibra grossolana ne limiti l'uso nell'abbigliamento la lana sudtirolese offre notevoli proprietà termiche, acustiche e strutturali, adatte a feltri, pannelli isolanti, elementi fonoassorbenti, rivestimenti interni, imbottiture per mobili e rinforzi compositi. La sua biodegradabilità, l'elevata riciclabilità e l'origine locale sono in linea con i principi del design circolare[5], poiché la lana può sostituire materiali sintetici e, al contempo, sostenere l'artigianato regionale (Fig. 10).

Sul piano tecnologico e infrastrutturale la filiera della lana evidenzia criticità rilevanti; il settore risulta tuttora marginale rispetto ai processi di innovazione agricola, con una limitata dotazione di sistemi evoluti per l'allevamento e di infrastrutture dedicate alla tosatura. Il nodo più critico riguarda tuttavia l'assenza di impianti per il lavaggio della lana: ciò costringe i produttori a trasferire la materia grezza fuori regione, in Tirolo (Austria), mentre gli allevatori, non disponendo di sbocchi locali per una risorsa in larga parte inutilizzata, sono spesso costretti a smaltirla, con conseguente aumento dei costi e un'ulteriore svalutazione della filiera. In risposta a questa condizione MICST ipotizza l'introduzione di unità di lavaggio decentralizzate a basso consumo energetico e di sistemi modulari di lavorazione in grado di riattivare la capacità locale di pre-lavorazione, integrando strategie di risparmio idrico e di impiego di energia da fonti rinnovabili (Fig .11).

Sul piano delle relazioni sistemiche, economiche e territoriali il valore pressoché nullo attribuito alla lana grezza accresce ulteriormente il carico economico già gravante sugli allevatori, contribuendo nel tempo all'abbandono dell'allevamento ovino a favore di altre attività. Tale dinamica comporta una contrazione del pascolo con ricadute negative sia sulla manutenzione dei versanti alpini sia sulla biodiversità; a questa fragilità si aggiunge l'assenza di infrastrutture locali per il lavaggio della lana, che consolida la dipendenza da un impianto estero ed espone l'intera filiera al rischio di un'interruzione improvvisa qualora tale impianto cessi di operare o non accetti più questo materiale. In risposta a questa condizione, MICST ipotizza la costruzione di un modello cooperativo regionale di lavorazione, potenzialmente in grado di riattivare le filiere locali, riconoscere una remunerazione più equa agli allevatori e reintegrare la lana nelle reti produttive circolari che mettono in relazione agricoltura, industria e design (Fig. 12).

La produzione locale di birra è in larga misura concentrata in un unico impianto, nel quale la maggior parte degli ingredienti proviene dall'esterno; ciò rende particolarmente strategica l'ottimizzazione delle risorse lungo l'intero processo produttivo. Le visite sul campo e l'analisi dei processi hanno consentito di individuare diversi sottoprodotti, tra cui le trebbie di birra (BSG) emerse come particolarmente rilevanti. Principale residuo della birrificazione le BSG corrispondono alla frazione solida dell'orzo maltato che rimane dopo la fase di ammostamento. La loro composizione, ricca di fibre, proteine e carboidrati residui, ne evidenzia il potenziale di valorizzazione. Allo stato attuale le BSG sono tuttavia destinate prevalentemente a impieghi di basso valore, come mangime animale o scarto, poiché l'elevato contenuto di umidità e l'instabilità biologica ne accelerano il deterioramento. Proprio queste caratteristiche compositive e organiche però indicano possibilità di impiego più promettenti, soprattutto in rapporto alla crescente vulnerabilità delle filiere cerealicole europee.

Sul piano delle proprietà materiali e degli usi potenziali le BSG si configurano come una risorsa biologica valorizzabile sia nel settore alimentare sia in applicazioni non alimentari orientate allo sviluppo di materiali e semilavorati a base biologica. L'elevato contenuto di fibre e proteine ne suggerisce l'impiego, da un lato in miscele di farine e prodotti da forno, dall'altro come componente per compositi e altri prodotti a base biologica. Le analisi preliminari indicano che le BSG possono contribuire sia al profilo nutrizionale sia ad alcune proprietà strutturali dei prodotti ottenuti: più in generale il loro riutilizzo amplia le possibilità di reintegrazione dei residui della birrificazione in filiere produttive circolari.

Dal punto di vista tecnologico e dei processi di stabilizzazione la principale barriera alla valorizzazione delle BSG è la loro instabilità dopo la produzione. Sono necessari processi efficienti di essiccazione o stabilizzazione per estendere la stabilità di stoccaggio e preservarne le proprietà funzionali. Ciò è essenziale non solo per gli usi alimentari ma anche per le applicazioni che richiedono sicurezza e durabilità. Sebbene alcune applicazioni alimentari esistano già, i metodi di stabilizzazione energeticamente efficienti e scalabili, nonché la compatibilità con le tecnologie di trasformazione convenzionali, necessitano ancora di approfondimento.

Sul piano delle relazioni sistemiche e delle integrazioni di filiera le BSG potrebbero essere reintegrate nelle filiere alimentari regionali come materia prima secondaria, in particolare attraverso collegamenti con produttori di farina, pane e mangimi. Tale collaborazione intersettoriale potrebbe sostenere modelli produttivi circolari in cui i residui della birrificazione vengono reindirizzati verso nuove filiere, riducendo gli scarti e migliorando l'efficienza delle risorse: in questo senso collaborazioni tra birrifici, produttori di mangimi e Centri di ricerca sono cruciali per sbloccare il pieno potenziale delle BSG.

Un altro sottoprodotto indagato è costituito dai noccioli di albicocca recuperati dalla distillazione locale della frutta, in particolare per la tradizionale produzione di schnapps. Il seme interno del nocciolo contiene oli pregiati e composti aromatici, il che gli conferisce un elevato potenziale come risorsa secondaria; tuttavia la sua valorizzazione per applicazioni alimentari o cosmetiche è estremamente vincolata dalla presenza di amigdalina, un composto cianogenico tossico presente in natura che rimarrebbe nel prodotto finale, rendendolo inadatto e pericoloso per l'uso umano (Fig. 13).

Per affrontare questa limitazione lo studio ha sviluppato e testato strategie di pretrattamento mirate a ridurre o eliminare l'amigdalina prima dell'estrazione. Tra i diversi metodi di deamarizzazione

valutati in condizioni di laboratorio un approccio si è rivelato particolarmente efficace, riducendo l'amigdalina a livelli non rilevabili: questo pretrattamento ottimizzato rappresenta un passaggio critico per consentire la valorizzazione sicura dei noccioli di albicocca come fonte di olio alimentare.

Sul piano delle proprietà compositive e del potenziale di valorizzazione i noccioli di albicocca presentano diverse proprietà che li rendono interessanti in quanto contengono una proporzione significativa di lipidi con una composizione favorevole di acidi grassi, oltre a proteine e composti aromatici che contribuiscono al loro caratteristico profilo, simile a quello della mandorla. Se opportunamente trattati per rimuovere i composti tossici, questi noccioli possono costituire una preziosa fonte di olio vegetale, con potenziali applicazioni culinarie e cosmetiche. Inoltre il riutilizzo dei noccioli derivanti dalla lavorazione della frutta si allinea alle strategie di circolarità dei materiali, consentendo il reinserimento dei residui agricoli in nuove filiere anziché trattarli come rifiuti.

Dal punto di vista tecnologico il nodo cruciale riguarda la presenza di amigdalina mantenendo la qualità del materiale del nocciolo. La ricerca ha dimostrato che l'adattamento di processi controllati di pretrattamento può eliminare efficacemente il composto tossico prima dell'estrazione. L'identificazione di un promettente approccio di deamarizzazione evidenzia il potenziale di integrare fasi di lavorazione relativamente semplici nei protocolli di estrazione esistenti, consentendo di trasformare ciò che è attualmente considerato un residuo problematico in una materia prima potenzialmente di valore.

Sul piano delle relazioni sistemiche e delle ricadute la questione della gestione dei noccioli di albicocca ha implicazioni dirette per i produttori locali. Le distillerie che producono schnapps di albicocca generano quantità considerevoli di noccioli come sottoprodotti, attualmente in gran parte inutilizzati e privi di un chiaro percorso di valorizzazione. Poiché le vie di smaltimento convenzionali, come l'incenerimento, il compostaggio e la fermentazione, non sono adatte ai noccioli di albicocca, le distillerie li conservano in loco (Fig. 14), riconoscendone il potenziale valore ma non disponendo di una soluzione di lavorazione praticabile. Lo sviluppo di strategie sicure di valorizzazione per questi noccioli potrebbe risolvere questa sfida, aggiungendo al contempo ulteriore valore a un prodotto regionale unico e al suo processo produttivo.

L'ultimo sottoprodotto analizzato è il siero del latte, principale sottoprodotto dell'industria lattiero-casearia, con circa 8-9 litri generati per chilogrammo di formaggio prodotto. Sebbene prevalentemente costituito da acqua (circa 93-94%), il siero contiene ancora componenti di valore come lattosio, sieroproteine, minerali e piccole quantità di grassi, per cui viene comunemente trasformato dalle grandi industrie lattiero-casearie in prodotti come polveri di sieroproteine, lattosio o mangimi per animali. Tuttavia questi processi richiedono energia, infrastrutture e trasporti, e non sono sempre accessibili ai caseifici più piccoli o di montagna. Inoltre il suo elevato carico organico fa sì che il siero smaltito impropriamente rappresenti un rischio ambientale significativo, in particolare attraverso l'inquinamento idrico.

Sul piano delle proprietà del sottoprodotto e delle possibilità di reimpiego l'analisi del settore lattiero-caseario regionale mostra un quadro già fortemente strutturato. Il recupero dei nutrienti e dei composti presenti nel siero richiede infatti processi tecnicamente complessi e investimenti significativi che rendono onerosa la sua reintegrazione in filiere alternative. In questo contesto l'elevato grado di ottimizzazione raggiunto dal comparto ha favorito l'attivazione di strategie gestionali efficienti: è stato implementato un ciclo a circuito chiuso, grazie alla realizzazione di un impianto regionale dedicato alla trasformazione del siero in polvere alimentare ad alto valore aggiunto, capace di assorbire l'intero quantitativo di siero industrialmente processato prodotto nella regione (Fig. 15). Entro un sistema già così organizzato la ricerca ha quindi indirizzato l'indagine verso la verifica di ulteriori margini di valorizzazione, esplorando la possibilità di individuare impieghi complementari non ancora intercettati dalle filiere esistenti.

Dal punto di vista tecnologico il fatto che la trasformazione industriale del siero sia oggi orientata quasi esclusivamente alla produzione di polvere ren-

Data Invio

gen 15, 2025 3:02 PM

Nome e Cognome:

[redacted]

E-mail di riferimento:

[redacted]

Nome dell'azienda:

[redacted]

wir produzieren Wein aus den angelieferten Trauben unserer Mitglieder - es sind im Schnitt der Jahre 2.000.000 kg Trauben, von denen mit einer Ausbeute von 70% jährlich ca. 1.400.000 l Wein entsteht

	Nome della fase di lavorazione specifica	Quantità lavorata massa/volume per mese	Quantità materia seconda (0)	Descrizione materia seconda(1)	Quantità Reimpiego (0)(1)	Quantità Scarto (0)	Destinazione scarto (1)	Costi di smaltimento
Fase 1	Einmaischung	2.000.000 kg Trauben in den Monaten September und Oktober	Stielgerüst	ca 85.000 kg			Kompostieranlage	0
Fase 2	Einmaischung	2.000.000 kg Trauben in den Monaten September und Oktober	Trester	ca. 220.000 kg			Brennereien	0
Fase 3	Einmaischung	2.000.000 kg Trauben in den Monaten September und Oktober	Geläger	ca. 130.000 kg			Distillerie	0
Fase 4	Filtration	105.000 kg bentonit	bentonit - landet zusätzlich im Geläger	ca 105.000 kg			Distillerie	0
Fase 5								

Fig. 3 | Example of questionnaire with responses (credit: Design Friction Lab, 2025).



Fig. 4 | On-site visits to selected companies and facilities (credits: Design Friction Lab, 2025).

de particolarmente rilevante l'esplorazione di percorsi alternativi ad alto valore aggiunto, capaci di diversificare gli output della filiera. In questa direzione, e con il supporto degli esperti di fermentazione del Consorzio, l'indagine ha verificato la possibilità di impiegare il siero come substrato per processi biotecnologici in grado di trasformarne i componenti in nuovi ingredienti o prodotti utili (Fig. 16). L'ipotesi più promettente riguarda la fermentazione del siero mediante microrganismi selezionati, finalizzata allo sviluppo di una bevanda fermentata; tale opzione è stata ritenuta coerente con la composizione nutrizionale del sottoprodotto e con la sua idoneità ai processi metabolici microbici. Le analisi sperimentali attualmente in corso si concentrano sul monitoraggio delle variazioni di pH e della perdita di CO_2, parametri che consentono di tracciare e valutare nel tempo le dinamiche fermentative.

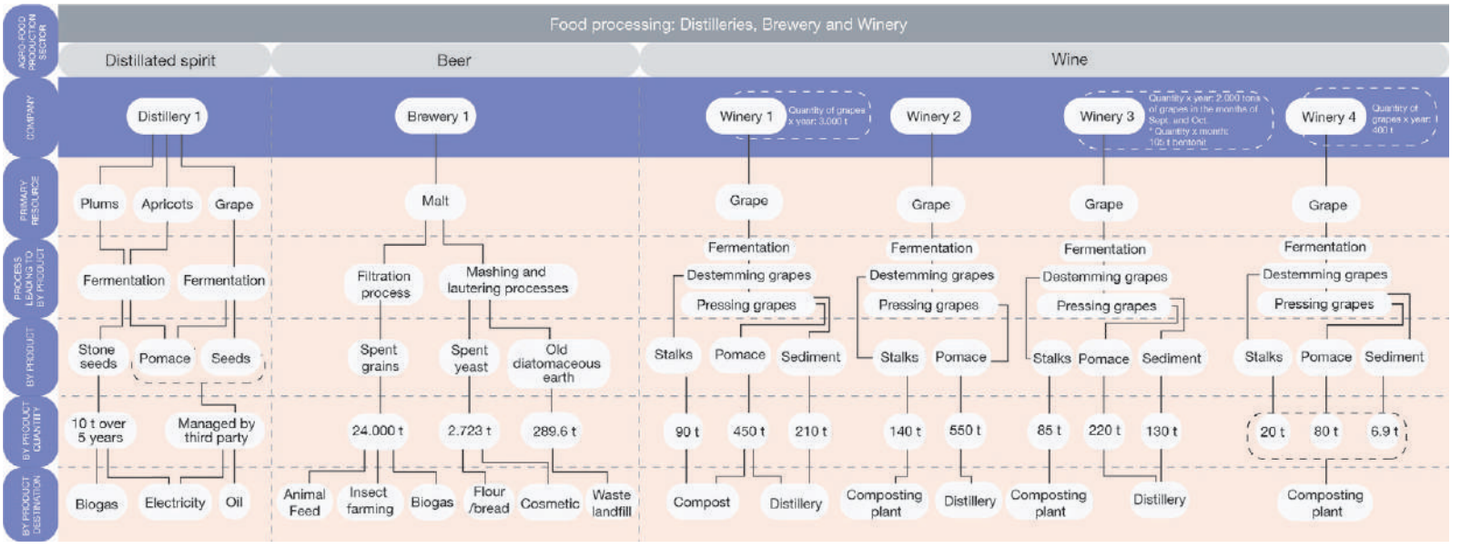
Sul piano sistemico il settore lattiero-caseario della regione rappresenta un ecosistema altamente ottimizzato, in cui, a scala industriale, i sottoprodotti sono pienamente integrati nei processi circolari. L'esistenza di un'azienda specializzata che gestisce il flusso industriale del siero dimostra un impegno industriale maturo nel chiudere i cicli materiali all'interno del settore alimentare. In questo contesto la ricerca non mira a sostituire i percorsi di valorizzazione esistenti, ma piuttosto a indagare scenari complementari che possano da un lato diversificare gli output della trasformazione a scala industriale, dall'altro offrire soluzioni praticabili per i produttori su piccola scala che attualmente non dispongono di opzioni per gestire il loro siero residuo.

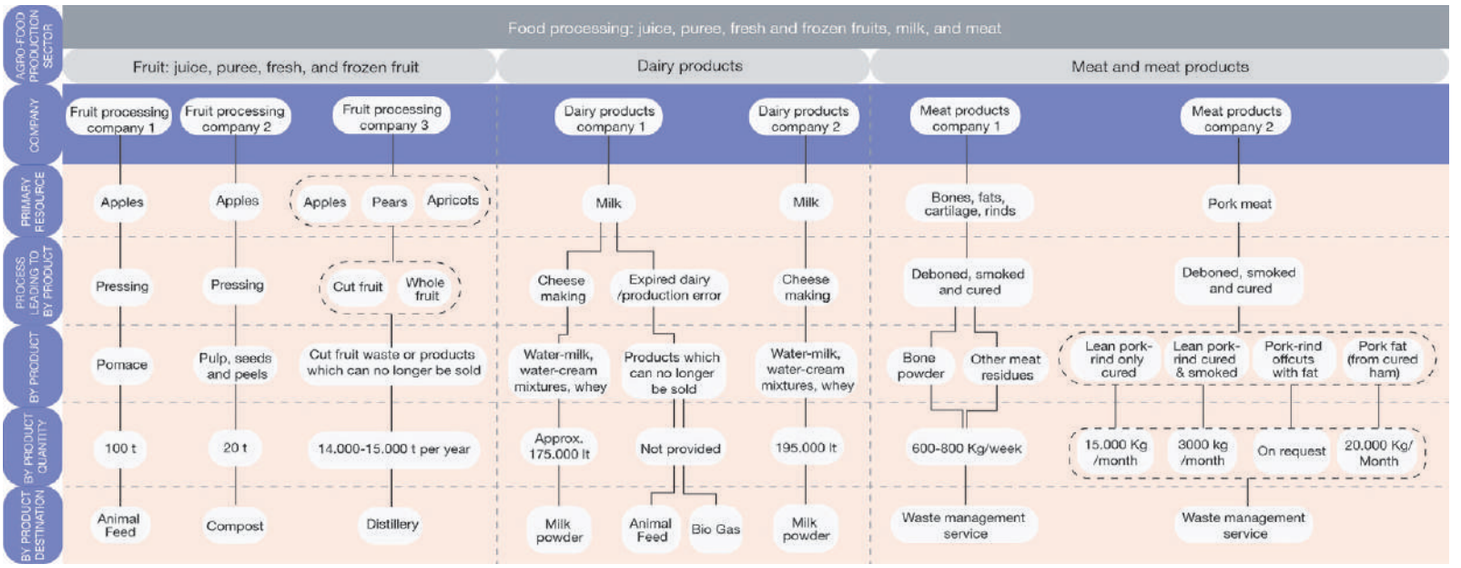
Contributo agli SDG, sinergie e compromessi | L'approccio sistemico adottato da MICST per la valorizzazione dei sottoprodotti si colloca all'intersezione di diverse dimensioni dello sviluppo sostenibile, evidenziando come le strategie di riuso delle risorse non producano effetti isolati, ma attivino relazioni tra ambiti industriali, sociali e ambientali. All'interno del quadro degli Obiettivi di Sviluppo Sostenibile (SDG) delle Nazioni Unite (UN, 2015) il progetto trova una corrispondenza più diretta con gli SDG 9, 10 e 12, che nel loro insieme restituiscono la natura multidimensionale delle azioni intraprese. In questa prospettiva gli SDG non sono intesi soltanto come obiettivi di riferimento, ma come una griglia interpretativa utile a valutare le sinergie attive e i possibili compromessi che emergono lungo le filiere analizzate.

In relazione all'SDG 9 (Imprese, innovazione e infrastrutture) il progetto contribuisce allo sviluppo di soluzioni innovative attraverso la mappatura sistematica dei sottoprodotti regionali e delle relative filiere produttive, individuando opportunità di trasformazione degli scarti in nuovi materiali, prodotti, impianti e servizi. Il coinvolgimento di industrie, aziende e Centri di ricerca rappresenta un elemento strutturante di questo processo, favorendo la coprogettazione di soluzioni tecniche e organizzative. In tale quadro una prospettiva sistemica (Maffei et alii, 2024) guida l'individuazione delle criticità e delle barriere presenti nelle filiere agroalimentari, consentendo di mettere in relazione gli aspetti tecnologici con i vincoli normativi, le condizioni economiche e le dinamiche geopolitiche che influenzano la disponibilità e la gestione delle risorse.

In relazione all'SDG 10 (Ridurre le disuguaglianze) la ricerca evidenzia come la valorizzazione dei sottoprodotti possa contribuire a riequilibrare alcune disparità strutturali che caratterizzano i sistemi produttivi locali. In particolare emergono disuguaglianze nell'accesso alle infrastrutture di trasformazione, alle tecnologie avanzate e alle risorse finanziarie necessarie a sostenere le attività agricole e artigianali. Tali condizioni risultano evidenti ad esempio nel caso della filiera della lana per carenze di impianti locali e aumento dei costi operativi che hanno contribuito alla progressiva chiusura di aziende ovine. In questo senso l'introduzione di soluzioni decentralizzate e cooperative non assume soltanto un valore tecnico ma rappresenta anche una strategia di riequilibrio territoriale e sociale.

In relazione all'SDG 12 (Consumo e produzione responsabili) la sostenibilità e l'economia circolare costituiscono l'asse portante dell'intero pro-





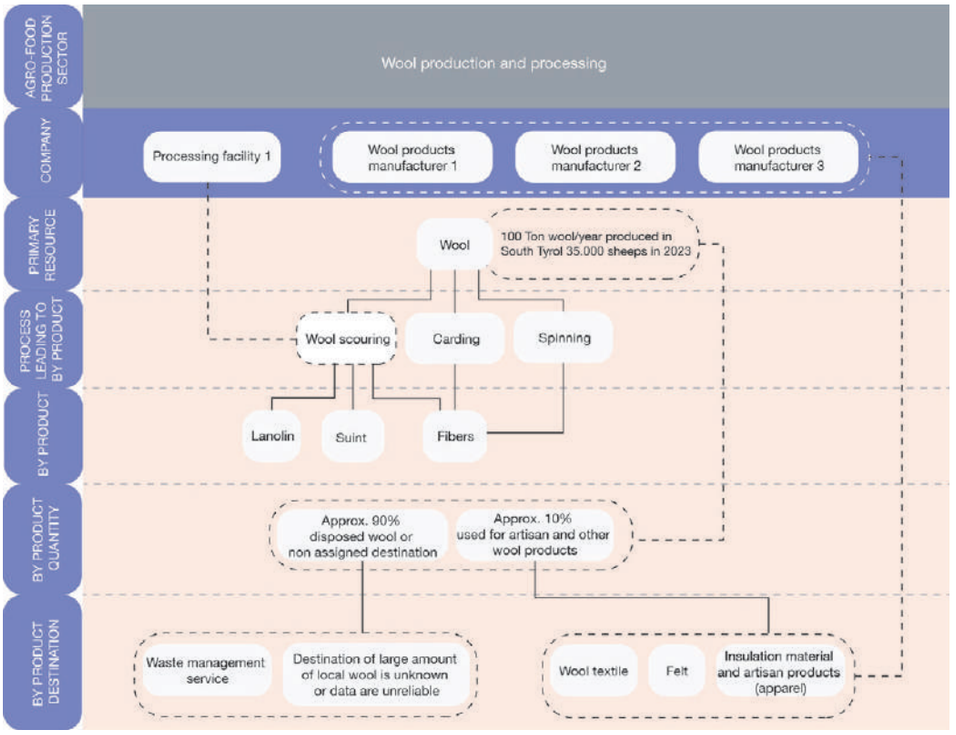


Fig. 5 | Flow diagrams of data provided by companies (credits: Design Friction Lab, 2025).

getto. Le strategie sviluppate mirano a ridurre gli sprechi, prolungare il ciclo di vita delle risorse e promuovere la trasformazione sostenibile degli scarti in nuovi materiali e prodotti. Questo orientamento consente non solo di valorizzare risorse locali spesso sottoutilizzate, ma anche di rafforzare il legame tra Patrimonio produttivo, cultura materiale e innovazione tecnologica, contribuendo alla costruzione di modelli produttivi più resilienti e adattivi.

Nel loro insieme queste azioni evidenziano come l'integrazione tra innovazione tecnologica, inclusione sociale e responsabilità ambientale generi sinergie tra gli obiettivi considerati, ma renda anche visibili alcuni compromessi, legati ad esempio agli investimenti necessari per l'implementazione di nuove infrastrutture, ai costi energetici associati ai processi di trasformazione e alla necessità di bilanciare efficienza produttiva e sostenibilità territoriale: è l'approccio sistemico adottato da MICST che consente di leggere tali compromessi non come criticità isolate, bensì come elementi strutturali da governare attraverso strategie progettuali integrate.

Discussione e conclusioni | Questo studio dimostra che la valorizzazione dei materiali residui non dipende solo dalle loro proprietà fisiche o biochimiche, ma anche dalle condizioni che ne plasmano la trasformazione, la circolazione e il riutilizzo (Morpurgo, 2024; Bofylatos, 2022; Bak-Andersen, 2021). L'analisi della lana, delle trebbie di birra, dei noccioli di albicocca e del siero dimostra che il sottoutilizzo è spesso caratterizzato da filiere frammentate, da una capacità di lavorazione limitata, da vincoli normativi e da deboli connessioni tra gli attori. Il principale risultato della ricerca è pertanto l'identificazione di concrete opportunità di valorizzazione che emergono quando le condizioni materiali, tecnologiche e sistemiche agiscono congiuntamente.

Da una prospettiva teorica e metodologica l'articolo posiziona il design come dispositivo di mediazione all'interno dei processi di transizione circolare, piuttosto che come attività a valle dello sviluppo prodotto. Il quadro MICST integra le lenti del materiale, della tecnologia e del sistema e consente di leggere simultaneamente i sottoprodotti residui come materia, processo e risorsa territoriale. In questo senso il contributo si rivela al contempo metodologico, attraverso una procedura strutturata ma adattabile per la mappatura e la valutazione dei sottoprodotti, e concettuale, inquadrando la circolarità come allineamento di materiali, attori, infrastrutture e filiere piuttosto che come mera sostituzione dei materiali.

Le implicazioni dello studio riguardano sia la ricerca che la pratica; per i ricercatori il quadro offre una metodologia replicabile ma sensibile al contesto per indagare i sistemi di materiali residui in altri territori circoscritti; per i tecnici e gli attori industriali evidenzia l'importanza della trasformazione intermedia, della tracciabilità e della collaborazione intersettoriale; per le Amministrazioni Pubbliche mostra che la transizione circolare richiede infrastrutture abilitanti, governance coordinata e misure di supporto mirate, non solo sensibilità ambientale o obiettivi di riciclo.

Allo stesso tempo lo studio resta esplorativo: l'accesso ai dati è dipeso dalla disponibilità delle aziende a collaborare, mentre alcuni settori si sono mostrati meno aperti di altri; inoltre i quattro sottoprodotti analizzati non presentano il medesimo livello di maturazione sperimentale. Le soluzioni fin qui delineate si collocano ancora in una fase di sviluppo e richiederanno ulteriori verifiche in condizioni industriali reali. A ciò si aggiungono l'incertezza finanziaria e la limitata diffusione di infrastrutture decentralizzate, che continuano a rappresentare ostacoli rilevanti all'attuazione su scala territoriale.

In questa prospettiva l'elemento maggiormente trasferibile ad altri contesti non risiede in un repertorio chiuso di soluzioni, bensì nella logica analitica del quadro proposto, fondata sulla mappatura territoriale, sul confronto con i casi di riferimento, sulla selezione intenzionale dei casi, sull'indagine sul campo e sulla valutazione multi-lente. Gli sviluppi futuri dovranno quindi concentrarsi sulla verifica dei percorsi individuati su scala più ampia, sulla valutazione della loro fattibilità tecnica, ambientale ed economica e sull'applicazione comparativa del quadro in altri contesti regionali. Sarà inoltre necessario approfondire i modelli di governance e gli strumenti di policy in grado di accompagnare il passaggio da sperimentazioni puntuali alla costruzione di filiere territoriali stabili. In ultima analisi l'articolo sostiene che la trasformazione sostenibile



Fig. 6 | Consortium meeting: presentation of the explanatory booklet of the data collected (credit: Design Friction Lab, 2025).

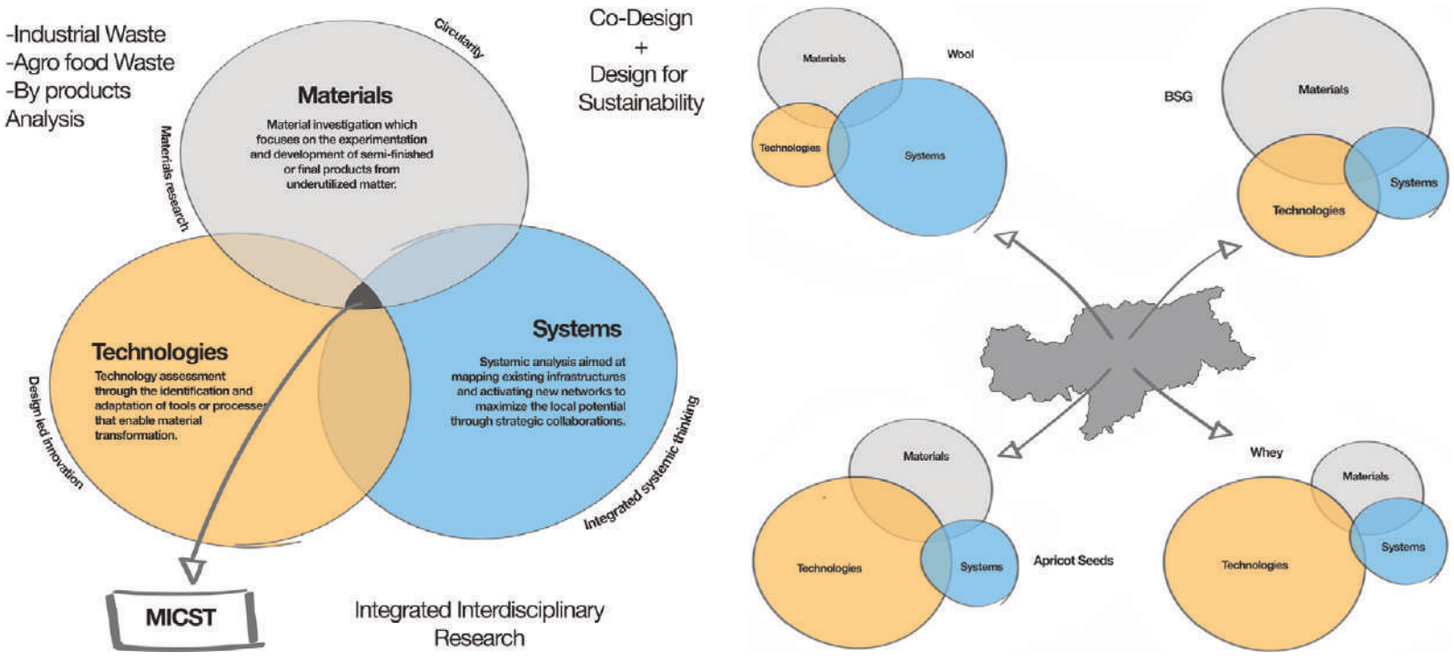


Fig. 7 | Research macro-areas and MICST approach for waste valorisation (credits: Design Friction Lab, 2026).

non può essere raggiunta attraverso la sola innovazione tecnologica; essa richiede infatti una riconfigurazione sistemica delle relazioni tra materiali, tecnologie, attori e filiere locali (Gaddi and Mastrolonardo, 2024). All'interno di questo processo il design svolge un ruolo centrale come pratica di mediazione, capace di connettere discipline, risorse e infrastrutture a sostegno di sistemi circolari resilienti e radicati nel territorio.

The evident environmental crisis requires rapid systemic responses to reduce the impact of industrialised production (IRP, 2019; Ulluwishewa, 2014). In line with the Sustainable Development Goals (SDGs; UN, 2015, 2022), production and agricultural systems must be rethought in order to minimise environmental harm while generating social and economic value (EMF, 2025). Within this transition, design recognises materials and their management as critical opportunities for sustainable production and consumption (Vezzoli and Manzini, 2018): once considered secondary within the design process, they now assume a central role (Karana et alii, 2015; Rognoli et alii, 2015) in enabling ecological transition. Unlike traditional materials development, oriented towards performance or market optimisation, material design today explores speculative and systemic alternatives in response to contemporary challenges. Over the past decade, design-led approaches have transformed material resources through interdisciplinary collaboration (Barbero and Ferrulli, 2023; Rognoli and Ayala-Garcia, 2021): increasingly, material innovation no longer arises exclusively from materials science, but from collaborations among designers, engineers, biologists, craftspeople, and farmers (D'Olivo and Karana, 2021), through a multidisciplinary approach emerging as a new paradigm.

Open-access technologies (Hofer, Hassan and Mies, 2024; Gershenfeld, 2012), democratised production systems (Bettiol and Micelli, 2014; Tanenbaum et alii, 2013), and renewed interest in craft practices (Jakob and Thomas, 2017; Sennett, 2008) make alternative industrial models possible (Geissdoerfer et alii, 2020; Anderson, 2012). Ultimately, achieving circularity requires recognising the value embedded in all resources involved in industrial and agro-industrial processes (Manzini and Vezzoli, 2003).

South Tyrol is characterised by consolidated craft traditions (Alexander, 2006) and by well-developed agricultural and manufacturing sectors: in 2019-2020, agro-industrial cultivated land covered 204,085 hectares, while manufacturing accounted for 30.8% of the regional economy (ASTAT, 2025). Given the volume of resources passing through these sectors, understanding how materials and by-products are processed, transformed, and discarded is essential for sustainable regional development.

With a relatively small population (504,643 inhabitants in 2024; ASTAT, 2025) and an autonomous governance structure, South Tyrol offers a compact and interconnected ecosystem suited to systemic experimentation. The close relationships among farmers, industry, research institutions, and public authorities facilitate an in-depth mapping of regional by-products, while the coexistence of high-altitude, self-sufficient agriculture and valley-based industrial development (Schneider, 2022) provides further insight into diversified resource-management strategies. At the same time, the strong interrelationship between agriculture and tourism places pressure on local waste-management systems (Fischer, 2019), generating both challenges and opportunities for circular innovation. Collaborative initiatives that bring together farmers, designers, and researchers further strengthen this transformative potential (Gaddi and Mastrolonardo, 2024), and are also supported by regional policies. The Provincial Action Plan explicitly calls for a change in production and consumption models[1], in line with the vision of 'small, local, open and connected' systems (Manzini, 2015), all of which create a favourable environment for experimenting with alternative material life cycles. At present, recycling accounts for 29% of total waste, while 44% is incinerated and 4% sent to landfill (ASTAT, 2025; Fig. 1).

Although recycling rates are relatively high, incineration remains prevalent, and recycling itself entails environmental costs. Approximately 40,000 tonnes of organic waste are processed each year through composting or biomethane production (Provincia Autonoma di Bolzano, 2024), and up to one third of raw food resources is lost during industrial processing, revealing significant untapped potential for valorisation. South Tyrol's industrialised agriculture, advanced waste-treatment infrastructure, and high environmental awareness therefore provide ideal conditions for investigating how industrial and agro-industrial by-products can be reintegrated into circular production systems.

A further motivating factor is the Italian Law No. 166/2016 (Presidente della Repubblica Italiana, 2016), which promotes the reduction of waste across all stages of production, processing, and distribution, with the aim of limiting environmental impacts, reducing waste generation, and extending product life cycles through reuse and recycling: this regulatory framework supports both the implementation and the potential scalability of the project at regional and national levels.

Starting from this context, the present contribution illustrates the preliminary outcomes of ongoing research, funded by the Autonomous Province of Bolzano and carried out by the MICST Consortium, aimed at identifying underused regional resources and integrating them into existing production chains or, where these are absent, developing new valorisation pathways (Santos Malaguti de Sousa et alii, 2023). In response to South Tyrol's strong agricultural specialisation, the research investigates agri-food waste and by-prod-

ucts through food-technology processes, from fermentation to advanced material treatments, in order to promote circular and regenerative production systems. The research also proposes an interdisciplinary methodology for developing an analytical framework based on material, technology, and a systemic approach, intended to support the valorisation and transformation of regional resources, particularly food and agricultural residues (Morpurgo, 2024; Bofylatos, 2022; Bak-Andersen, 2021).

Focusing on four by-products, the study shows how the framework can be applied in real industrial contexts: wool, brewer's spent grain, apricot kernels, and whey were identified through field research activities conducted in collaboration with local industries and stakeholders. The contribution is structured into sections: after outlining the research methods and the interdisciplinary process that led to the development of the framework, the article presents the four by-products in order to illustrate their potential for generating new materials, products, and broader forms of sustainable value at the regional scale.

Methodology and phases | This study adopted an exploratory, design-led research approach aimed at identifying, mapping, and assessing the valorisation potential of agro-industrial by-products in South Tyrol through an interdisciplinary systemic framework (Klein, 1990) grounded in the territory (Barbero and Ferrulli, 2023). The MICST Consortium brings together expertise in design, food technology[2], fermentation[3], anthropology, and local waste management[4], enabling a broad analysis of the material, technological, and systemic dimensions (Olivastri and Tagliasco, 2024) of local products.

The research was developed in five phases. In the first phase, the regional production system was analysed by mapping industrial and agri-food by-products and the main waste-management infrastructures. Preliminary visits were carried out to landfill sites, incineration plants, energy-recovery systems, and anaerobic digestion centres, in collaboration with the competent regional authority, in order to understand how South Tyrol's autonomous governance structure influences waste management, recovery, and disposal.

In the second phase, the research combined a literature review, case studies (Boblin et alii, 2013), and taxonomic classification (Bailey, 1994) to categorise by-products according to their material characteristics, current uses, and possible alternative applications. This phase also involved comparison with international reference cases (Tab. 1) and considered the relevance of local knowledge held by farmers and producers in mountain contexts (Cole and Wolf, 1999; Schneider, 2022).

In the third phase, the research was conducted through stakeholder engagement and field investigation (Driscoll, 2011; Massari et alii, 2025). Collaboration with the regional Chamber of Commerce provided access to a register of companies, cooperatives, and associations, enabling the mapping of relevant sectors and networks of local facilities (Fig. 2). Case selection followed a purposive logic, prioritising actors with high production capacity, regular by-product generation, territorial relevance, and accessibility for the research, with reference to the production of wine, apple juice, spirits, dairy products, meat production, and sheep and cattle grazing. On this basis, 72 companies were contacted through a standardised e-mail protocol, requesting information on the existence of underutilised by-products, the quantities produced, and their management practices.

Structured questionnaires were distributed to the 25 companies that replied to the e-mail (34.7%), in order to collect comparable data on by-product type, approximate quantities, continuity of generation, treatment or disposal practices, cost or perceived economic value, and possible transfer to secondary industries (Fig. 3). Subsequently, 12 visits were carried out to selected companies and facilities, prioritising cases with high residual volumes, sectoral relevance, and experimental potential (Fig. 4). The visits followed a common protocol aimed at documenting production processes, identifying visible and less visible by-products, clarifying storage and transfer practices, and establishing relationships of trust with stakeholders. The evidence was synthesised in flow diagrams and comparative by-product sheets (Fig. 5).

In the fourth phase, wool, brewer's spent grain, apricot kernels, and whey were selected for in-depth study according to criteria of territorial relevance, current underutilisation or disposal burden, material or biochemical potential, accessibility for field and laboratory investigation, representativeness in relation to agro-industrial production chains, and the willingness of companies and associations to collaborate. Material experimentation was guided by approaches such as 'material-driven design' (Karana et alii, 2015), 'material tinkering' (Parisi, Rognoli and Sonneveld, 2017), and material selection methods based on analysis, synthesis, and similarity (Ashby and Johnson, 2014), while co-design approaches (Zamenopoulos and Alexiou, 2018) supported the development of a simplified prototype. After primary data collection and the sharing of an explanatory document, the results were discussed in a joint meeting with the partners to define the next phases of the research and align the reuse pathways for each area of expertise (Fig. 6).

In the fifth phase, the selected by-products were analysed through the MICST framework (Fig. 7), structured around three interrelated macro-areas: industrial waste analysis, studies on agri-food by-products, and co-design / design for sustainability. Each by-product was then assessed through the lenses of material, technology, and systemic relations: the material lens considered physical, compositional, sensory, or functional properties and possible applications; the technological lens examined pre-treatment requirements, process feasibility, and infrastructural constraints; and the systemic lens addressed actor networks, logistics, regulation, economic sustainability, and opportunities for integration into local production chains. The four cases were assessed according to parameters relating to the quantity and continuity of processing-waste generation, current destination, level of underutilisation, regulatory constraints, workability, compatibility with infrastructure, and potential for local circularity. In parallel, the agri-food production chains and networks of local facilities were examined according to political, economic, technological, social, legal-regulatory, and environmental factors (Mallik, 2025), in order to

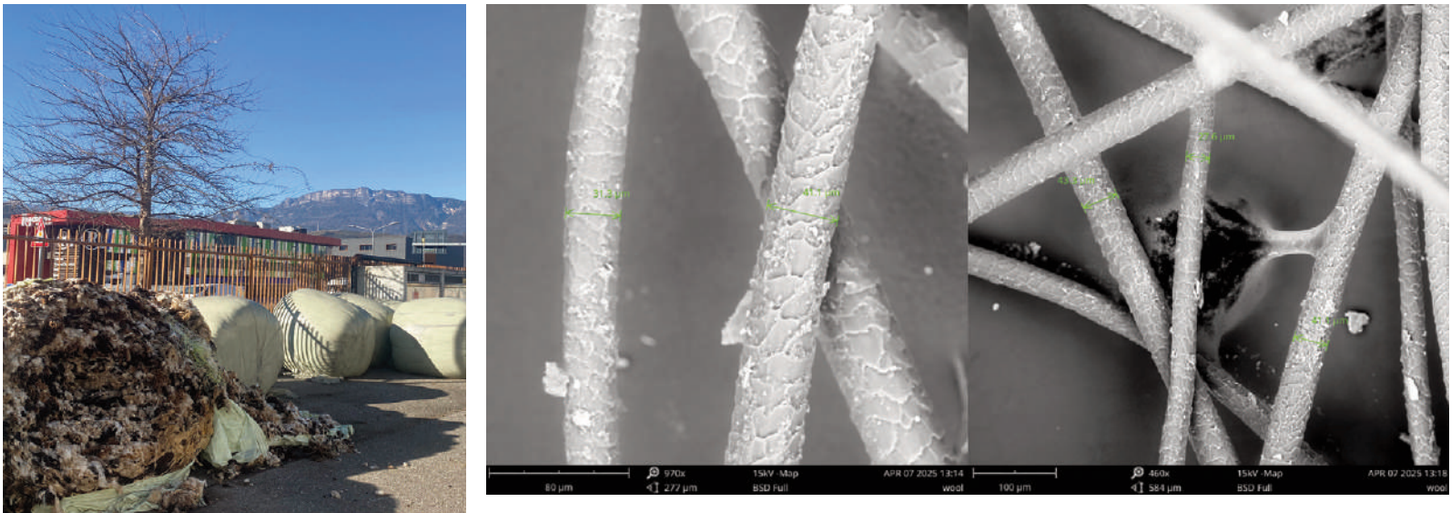


Fig. 8 | Wool collected and stored by the local association of small breeders (Verband der Kleintierzüchter); microscopic analysis of coarse locally sourced wool (credits: Design Friction Lab, Food Technology Laboratory, NOI Techpark, 2025).

identify barriers, implications, and opportunities in the production, management, distribution, and transformation of residual resources. Structured in this way, the analytical framework supports the development and assessment of long-term sustainable solutions calibrated to the context, and can be replicated beyond South Tyrol.

The study is exploratory in nature and should be read as a simplified yet structured prototype, rather than as a fully standardised comparative assessment, since access to cases depended on companies' willingness to collaborate, and the four selected by-products do not present the same degree of experimental maturity. Nevertheless, the procedure is reproducible through the same sequence: mapping, review of reference cases, purposive case selection, questionnaire, field-visit protocol, by-product selection criteria, and multi-lens assessment.

Preliminary research findings on four products | On the basis of mapping, stakeholder engagement, and multi-lens analysis, the initial research findings concern the assessment of the four selected agro-industrial by-products. Rather than offering definitive solutions, the results outline emerging valorisation pathways, key constraints, and context-specific opportunities through the material, technological, and systemic perspectives. As such, the findings should be understood as evidence-based indications of the potential for integrating underutilised resources into regional circular production systems.

For wool, the research showed that approximately 90 tonnes of South Tyrolean wool remain unused every year, since it is mainly discarded by farmers or collected by cooperatives without a predefined destination, while only 10 tonnes are currently used, primarily for small-scale traditional craft products. Although internationally recognised as part of Alpine cultural heritage, local wool has limited contemporary applications due to its coarse, robust fibres (Fig. 8), limiting its use because it cannot compete with finer fibres such as merino (Fig. 9), which dominate the apparel market.

Market demand means that local wool has virtually no value for farmers, who already face economic difficulties. Sheep must be shorn regularly, usually twice a year, yet the inadequate valorisation of wool leads to its accumulation, creating an environmental burden. In addition, raw wool is classified as a 'Category 3' animal by-product and must be managed in accordance with Regulation (EC) No. 1069/2009 (European Parliament and Council of the European Union, 2009), which sets out specific procedures for processing, transport, and disposal. This challenge is not exclusive to South Tyrol but is found in many European regions; addressing it therefore requires a contextualised approach capable of responding to local conditions, resources, and capacities. At the same time, valuable insights can be drawn from strategies and innovations already implemented in other regions facing similar issues (Gaddi and Mastrolonardo, 2024; Knapp, 2022).

In terms of material properties and possible applications, collaboration with local textile and design actors revealed multiple opportunities for revalorisation. Although its coarse fibre limits its use in apparel, South Tyrolean wool offers significant thermal, acoustic, and structural properties, making it suitable for felt, insulation panels, sound-absorbing elements, interior linings, furniture padding, and composite reinforcements. Its biodegradability, high recyclability, and local origin align with the principles of circular design[5], as wool can replace synthetic materials while also supporting regional craftsmanship (Fig. 10).

From a technological and infrastructural perspective, the wool production chain reveals significant criticalities. The sector remains marginal to agricultural innovation processes, with limited access to advanced breeding systems and dedicated shearing infrastructure. The most critical issue, however, concerns the absence of wool-scouring facilities. This forces producers to transfer raw material outside the region, to Tyrol (Austria), while farmers, lacking local outlets for a resource that is largely unused, are often forced to dispose of it, thereby increasing costs and further devaluing the chain. In response to this condition, MICST envisages the introduction of decentralised, low-energy scouring units and modular processing systems capable of reactivating local pre-processing capacity while integrating water-saving strategies and renewable-energy use (Fig. 11).

From the perspective of systemic, economic, and territorial relations, the almost negligible value attributed to raw wool further increases the economic burden already borne by farmers, contributing over time to the abandonment of sheep farming in favour of other activities. This dynamic reduces grazing, with negative consequences both for the maintenance of Alpine slopes and for biodiversity. This fragility is compounded by the absence of local scouring infrastructure, which consolidates dependence on a foreign facility and exposes the entire production chain to the risk of sudden disruption should that facility cease operating or no longer accept this material. In response to this condition, MICST envisages the construction of a regional cooperative processing model potentially capable of reactivating local value chains, recognising fairer remuneration for farmers, and reintegrating wool into circular production networks that connect agriculture, industry, and design (Fig. 12).

Local beer production is largely concentrated at a single facility, where most ingredients are sourced from outside the region. This makes the optimisation of resources throughout the production process particularly strategic. Field visits and process analysis made it possible to identify several by-products, among which Brewer's Spent Grain (BSG) emerged as particularly relevant. As the main residue of brewing, BSG corresponds to the solid fraction of malted barley that remains after mashing. Its composition, rich in fibre, protein, and residual carbohydrates, highlights its potential for valorisation. At present, however, BSG is mainly used for low-value applications, such as animal feed or disposal, because its high moisture content and biological instability accelerate deterioration. Yet these compositional and organic characteristics indicate more promising uses, especially given the growing vulnerability of European cereal supply chains.

In terms of material properties and potential uses, BSG can be understood as a biological resource that may be valorised both in the food sector and in non-food applications aimed at developing bio-based materials and semi-finished products. Its high fibre and protein content suggests its use, on the one hand, in flour blends and baked products and, on the other, as a component of composites and other bio-based products. Preliminary analyses indicate that BSG can contribute to both the nutritional profile and certain structural properties of the resulting products. More broadly, its reuse expands the possibilities for reintegrating brewing residues into circular production chains.

From the technological perspective and in relation to stabilisation processes, the main barrier to BSG valorisation is its instability after production. Efficient drying or stabilisation processes are required to extend shelf-life and preserve functional properties. This is essential not only for food uses but also for applications requiring safety and durability. Although some food applications already exist, energy-efficient and scalable stabilisation methods, as well as compatibility with conventional transformation technologies, still require further investigation.

From the perspective of systemic relations and production-chain integration, BSG could be reintegrated into regional food chains as a secondary raw material, particularly through links with flour, bread, and feed producers. This cross-sectoral collaboration could support circular production models in which brewing residues are redirected towards new chains, reducing waste and improving resource efficiency. In this sense, collaborations among breweries, feed producers, and research centres are crucial to unlocking the full potential of BSG.

Another by-product investigated consists of apricot stones recovered from local fruit distillation, particularly for the traditional production of schnapps. The inner kernel of the stone contains valuable oils and aromatic compounds, giving it considerable potential as a secondary resource. However, its valorisation for food or cosmetic applications is severely constrained by the presence of amygdalin, a naturally occurring toxic cyanogenic compound. Without targeted treatment during or after extraction, amygdalin would remain in the final product, making it unsuitable and unsafe for human use (Fig. 13). To address this limitation, the study developed and tested pre-treatment strategies aimed at reducing or eliminating amygdalin before extraction. Among the different debittering methods evaluated under laboratory conditions, one approach proved particularly effective, reducing amygdalin to undetectable levels. This optimised pre-treatment represents a critical step towards enabling the safe valorisation of apricot kernels as a source of edible oil.

In terms of compositional properties and valorisation potential, apricot kernels have several properties that make them interesting. They contain a significant proportion of lipids with a favourable fatty-acid composition, as well as proteins and aromatic compounds that contribute to their characteristic almond-like profile. If properly treated to remove toxic compounds, these kernels can provide a valuable source of plant-based oil, with potential culinary and cosmetic applications. In addition, the reuse of kernels derived from fruit processing aligns with material circularity strategies, allowing agricultural residues to be reintegrated into new value chains rather than treated as waste.

From a technological perspective, the crucial issue is how to address the presence of amygdalin

while maintaining the quality of the kernel material. The research has shown that adapting controlled pre-treatment processes can effectively eliminate the toxic compound before extraction. The identification of a promising debittering approach highlights the potential to integrate relatively simple processing steps into existing extraction protocols, enabling the transformation of what is currently considered a problematic residue into a potentially valuable raw material.

From a systemic perspective on relations and impacts, the management of apricot kernels has direct implications for local producers. Distilleries producing apricot schnapps generate considerable quantities of stones as by-products, which remain largely unused and lack a clear pathway for valorisation. Since conventional disposal routes, such as incineration, composting, and fermentation, are not suitable for apricot stones, distilleries store them on site (Fig. 14), recognising their potential value but lacking a practicable processing solution. Developing safe valorisation strategies for these kernels could address this challenge while adding further value to a distinctive regional product and its production process.

The final by-product analysed is whey, the main by-product of the dairy industry, which yields approximately 8-9 litres for every kilogram of cheese produced. Although it consists mainly of water (approximately 93-94%), whey still contains valuable components, including lactose, whey proteins, minerals, and small amounts of fat. For this reason, large dairy industries commonly convert whey into products such as whey protein powders, lactose, or animal feed. However, these processes require energy, infrastructure, and transport, and are not always accessible to smaller or mountain-based dairies. In addition, its high organic load means that improperly disposed whey represents a significant environmental risk, particularly through water pollution.

From the perspective of by-product properties and reuse opportunities, the analysis of the regional dairy sector reveals an already highly structured situation. Recovering nutrients and compounds from whey requires technically complex processes and significant investment, making its reintegration into alternative chains demanding. In





Fig. 9 | Imported wool processed in a scouring facility in Biella (credit: Design Friction Lab, 2025).

Fig. 10 | Meeting with a local wool-product manufacturer (credit: Design Friction Lab, 2025).



Fig. 11 | Case study of a scouring machine designed by the 'Pro Verzasca' association (credit: Design Friction Lab, 2025).



Fig. 12 | Case study of a small-scale local wool-processing facility in Slovakia (credit: Vlnarska Manufaktura).









Fig. 13 | Oil extracted from apricot kernels (credit: Food Technology Laboratory, NOI Techpark, 2025).

Fig. 14 | Apricot stones stored in a local distillery (credit: Design Friction Lab, 2025).

Fig. 15 | Locally produced whey powder (credit: Design Friction Lab, 2025).

Fig. 16 | Whey fermentation (credit: Fermentation Laboratory, Laimburg Research Centre, 2025).

No.	By-product	Case study	Promoter	Start year	Country	Lessons learned	Strengths	Weaknesses	MICST lens
1	Wool	Using wool scraps as packaging material	Woola	2020-ongoing	Estonia	This case shows how a locally available residual material can respond to a common packaging need and be translated into an everyday application; the use of local wool also suggests potential transferability to other European regions with comparable sheep-farming systems	The project develops aalternative bubble-wrap made from surplus wool, using a material sourced from Estonian farmers and exploiting its protective and cushioning properties	Its systemic impact may be limited by scalability, cost, and the risk that a material-based sustainability narrative overshadows broader infrastructural, logistical, and market conditions.	Material perspective
2	Brewer's spent grain	Repurposing brewer's spent grain for food production	Stiegl Brewery, in collaboration with Easy Vegan; CEFoodCycle Award 2024, Interreg Alpine Space	2024	Austria	The case demonstrates how brewer's spent grain can be redirected from low-value uses towards food-grade applications, reducing waste while retaining value within the local production chain	It offers a relevant example of cross-sector valorisation, combining brewery residues, food innovation, and circular economy principles within a regional value-chain logic	As an EU-funded pilot, its long-term relevance depends on the stability of partnerships, economic viability after the project phase, and effective integration into routine production	Systemic perspective
3	Apricot kernels	Repurposing apricot kernels for cosmetic and food applications	Kern Tec	2019-ongoing	Austria	The case highlights the potential to transform a difficult-to-dispose fruit-processing residue into a higher-value resource for food and cosmetic applications, provided that safety constraints are adequately managed	It enables high-value recovery through oil extraction and the development of proteins, ingredients, and other kernel-derived products.	Valorisation depends on sufficient and continuous material volumes, dedicated pre-treatment, and advanced processing technologies to ensure product safety and quality	Technological perspective

Tab. 1 | Comparison of international case studies (credit: Design Friction Lab, 2024).

this context, the high level of optimisation achieved by the sector has supported the activation of efficient management strategies. In particular, a closed-loop cycle has recently been implemented through the creation of a regional facility dedicated to transforming whey into high-value food-grade powder, capable of absorbing the entire quantity of industrially processed whey produced in the region (Fig. 15). Within such an organised system, the research therefore directed its enquiry towards identifying further margins for valorisation, exploring the possibility of complementary uses not yet captured by existing chains.

From the technological perspective, the fact that the industrial transformation of whey is currently oriented almost exclusively towards powder production makes the exploration of alternative high-value pathways particularly relevant, as these could diversify the outputs of the chain. In this direction, and with the support of the consortium's fermentation experts, the investigation assessed the possibility of using whey as a substrate for biotechnological processes capable of transforming its components into new ingredients or useful products (Fig. 16). The most promising hypothesis concerns the fermentation of whey through selected microorganisms, aimed at developing a fermented beverage. This option was considered consistent with the nutritional composition of the by-product and with its suitability for microbial metabolic processes. The experimental analyses currently under way focus on monitoring pH variations and CO_2 loss, parameters that make it possible to track and evaluate fermentation dynamics over time.

From the systemic perspective, the regional dairy sector represents a highly optimised ecosystem in which, at industrial scale, by-products are fully integrated into circular processes. The existence of a specialised company managing the industrial whey stream demonstrates a mature industrial commitment to closing material loops within the food sector. In this context, the research does not aim to replace existing valorisation pathways, but rather to investigate complementary scenarios that can, on the one hand, diversify the outputs of industrial-scale transformation and, on the other, offer practicable solutions for small-scale producers who currently lack options for managing their residual whey.

Contribution to the SDGs, synergies, and trade-offs | The systemic approach adopted by MICST for by-product valorisation is situated at the intersection of several dimensions of sustainable development, showing how resource-reuse strategies do not generate isolated effects but activate relations among industrial, social, and environmental domains. Within the framework of the United Nations SDGs (UN, 2015), the project aligns more closely with SDGs 9, 10, and 12, which together capture the multidimensional nature of the actions undertaken. From this perspective, the SDGs are not understood only as reference objectives but also as an interpretative grid for assessing activated synergies and possible trade-offs emerging along the production chains analysed.

With regard to SDG 9 (Industry, innovation and infrastructure), the project contributes to the development of innovative solutions by systematically mapping regional by-products and their related production chains, identifying opportunities to transform waste into new materials, products, facilities, and services. The involvement of industries, companies, and research centres is a structuring element of this process, encouraging the co-design of technical and organisational solutions. Within this framework, a systemic perspective (Maffei et alii, 2024) guides the identification of criticalities and barriers in agro-food chains, enabling the linkage of technological aspects to regulatory constraints, economic conditions, and geopolitical dynamics that influence the availability and management of resources.

With regard to SDG 10 (Reduced inequalities), the research shows how by-product valorisation can help rebalance some of the structural disparities that characterise local production systems. In particular, inequalities emerge in access to transformation infrastructure, advanced technologies, and the financial resources required to sustain agricultural and craft activities. These conditions are evident, for example, in the wool production chain, where the lack of local facilities and the increase in operating costs have contributed to the progressive closure of sheep farms. In this sense, the introduction of decentralised and cooperative solutions has not only technical value but also represents a strategy for territorial and social rebalancing.

With regard to SDG 12 (Responsible consumption and production), sustainability and the circular economy form the backbone of the entire project. The strategies developed aim to reduce waste, extend the life cycle of resources, and promote the sustainable transformation of waste into new ma-

terials and products. This orientation enables not only the valorisation of local resources that are often underutilised but also the strengthening of the relationship between production heritage, material culture, and technological innovation, contributing to the construction of more resilient and adaptive production models. Taken together, these actions show how the integration of technological innovation, social inclusion, and environmental responsibility generates synergies among the objectives considered, while also making visible certain trade-offs, for example, those linked to the investments required to implement new infrastructure, the energy costs associated with transformation processes, and the need to balance production efficiency with territorial sustainability. In this sense, the systemic approach adopted by MICST enables reading these trade-offs not as isolated criticalities but as structural elements to be governed through integrated design strategies.

Discussion and conclusions | This study shows that the valorisation of residual materials depends not only on their physical or biochemical properties, but also on the conditions that shape their transformation, circulation, and reuse (Morpurgo, 2024; Bofylatos, 2022; Bak-Andersen, 2021). The analysis of wool, brewer's spent grain, apricot kernels, and whey demonstrates that underutilisation is often characterised by fragmented production chains, limited processing capacity, regulatory constraints, and weak connections among actors. The main outcome of the research is therefore the identification of concrete valorisation opportunities that emerge when material, technological, and systemic conditions are considered jointly.

From a theoretical and methodological perspective, the article positions design as a mediating device within circular transition processes, rather than as an activity located downstream of product development. The MICST framework integrates the material, technological, and systemic perspectives, enabling the reading of residual by-products simultaneously as matter, process, and territorial resource. In this sense, the contribution is both methodological, through a structured yet adaptable procedure for mapping and assessing by-products, and conceptual, by framing circularity as an alignment of materials, actors, infrastructures, and production chains, rather than as mere material substitution.

The study's implications concern both research and practice. For researchers, the framework offers a replicable yet context-sensitive methodology for investigating residual material systems in other circumscribed territories. For technical experts and industrial actors, it highlights the importance of intermediate transformation, traceability, and cross-sectoral collaboration. For public administrations, it shows that circular transition requires enabling infrastructure, coordinated governance, and targeted support measures, not only environmental awareness or recycling targets.

At the same time, the study remains exploratory. Access to data depended on the willingness of companies to collaborate, while some sectors proved less open than others. In addition, the four by-products analysed do not have the same level of experimental maturity. The solutions outlined so far are still at an early stage of development and will require further verification under real industrial conditions. Financial uncertainty and the limited diffusion of decentralised infrastructure also remain significant obstacles to implementation at the territorial scale. From this perspective, the element most transferable to other contexts is not a closed repertoire of solutions but the analytical logic of the proposed framework, based on territorial mapping, comparison with reference cases, purposive case selection, field investigation, and multi-lens assessment. Future developments should therefore focus on testing the identified pathways at a wider scale, assessing their technical, environmental, and economic feasibility, and applying the framework comparatively in other regional contexts. Further work will also be needed on governance models and policy instruments capable of accompanying the transition from punctual experiments to the construction of stable territorial production chains.

Ultimately, the article argues that sustainable transformation cannot be achieved solely through technological innovation. It requires a systemic reconfiguration of the relations among materials, technologies, actors, and local production chains (Gaddi and Mastrolonardo, 2024). Within this process, design plays a central role as a mediating practice, connecting disciplines, resources, and infrastructure to support resilient circular systems rooted in place.

Acknowledgements

MICST (Material Innovation as a Catalyst for Sustainable Transition in South Tyrol) is a three-year research project (36 months) funded by the Autonomous Province of Bolzano (Italy) under the 'Research Südtirol / Alto Adige 2022' call, for a total of approximately 450,000 euros. The funds were awarded to the MICST consortium, coordinated by the Design Friction Lab of the Faculty of Design and Art at the Free University of Bozen-Bolzano, the project leader, in collaboration with the Fermentation and Distillation Group of the Laimburg Research Centre. Additional partners in the project are the Food Technology Lab (UniBZ) and the Waste Management Office of the Autonomous Province of Bolzano. The project is currently in the second of its three planned years, in the phase of developing the preliminary results presented in this contribution.The contribution is the result of a common reflection by the Authors. The roles in this publication are acknowledged as follows: C. Ayala-Garcia, writing, original draft preparation, methodology development, review, and editing; N. R. Paul, field research and review; L. Bordini, field research and review; M. Stepanovic, methodology development; N. Cohen, head of design, project coordination, writing, and review. All the Authors have read and approved the published version of this manuscript.

The Authors wish to thank the Autonomous Province of Bolzano for funding this research and for its continued interest in and support for the activities carried out to date. Special thanks go to the project partners for their valuable contributions to the different research streams: G. Ferrentino, from the Food Science and Food Technology platform, for his contribution to the research on by-product 3 (apricot kernels); L. Conterno and L. Girardi, from the Laimburg Research Centre, for the experimentation on by-product 4 (whey); and G. Angelucci and E. Poznanski, from the Waste Management Office, for their collaboration and support. The Authors also sincerely thank all the companies and stakeholders who contributed, directly or indirectly, to the advancement of the research, particularly those who opened their facilities to enable the research group to understand their processes, analyse their by-products, and collect data.

Further information relating to this study may be requested from the corresponding author upon reasonable request.

This work was supported by the Open Access Publishing Fund of the Free University of Bozen-Bolzano.

Notes

1) For further information, see the webpage: news.provincia.bz.it/it/everyday-for-future [Accessed 13 April 2026].

2) Food Technology Platform, Free University of Bozen-Bolzano. For further information, see the webpage: unibz.it/en/faculties/agricultural-environmental-food-sciences/research/food-sciences/ [Accessed 13 April 2026].

3) Laimburg Research Centre, Autonomous Province of Bolzano. For further information, see the webpage: laimburg.it/en/research-topics/food-technology [Accessed 13 April 2026].

4) Waste Management Office, Autonomous Province of Bolzano. For further information, see the webpage: ambiente.provincia.bz.it/it/rifiuti-suolo/home [Accessed 13 April 2026].

5) For further information, see the webpage: ellenmacarthurfoundation.org/topics/circular-design/overview [Accessed 13 April 2026].

References

Alexander, H. (2006), *Die industrielle Entwicklung in Südtirol im 19. und 20 – Jahrhundert*, Folio Verlag, Wien.

Anderson, C. (2012), *Makers – The New Industrial Revolution*, Crown Business, New York.

Ashby, M. F. (2013), *Materials and the Environment – Eco-informed Material Choice*, Butterworth-Heinemann, Amsterdam. [Online] Available at: doi.org/10.1016/C2010-0-66554-0 [Accessed 30 March 2026].

Ashby, M. F. and Johnson, K. (2014), *Materials and Design – The Art and Science of Material Selection in Product Design*, Butterworth-Heinemann, Oxford. [Online] Available at: doi.org/10.1016/C2011-0-05518-7 [Accessed 16 April 2026].

ASTAT (2025), *Statistisches Jahrbuch für Südtirol | Annuario Statistico della Provincia di Bolzano*, Bolzano. [Online] Available at: assets-eu-01.kc-usercontent.com/b5376750-8076-01cf-17d2-d343e29778a7/dcac2513-3b29-401d-a326-8c6e3632f1d9/JB2025%20-%20web.pdf [Accessed 30 March 2026].

Bailey, K. D. (1994), *Typologies and Taxonomies – An Introduction to Classification Techniques*, Sage Publications, Thousand Oaks.

Bak-Andersen, M. (2021), *Reintroducing Materials for Sustainable Design – Design process and educational practice*, Routledge, London.

Barbero, S. and Ferrulli, E. (2023), "Transizione ecologica e digitale – Il design Sistemico nei processi di innovazione aperta delle PMI | Ecological and digital transition – Systemic Design in SMEs open innovation processes", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 13, pp. 269-280. [Online] Available at: doi.

org/10.19229/2464-9309/13232023 [Accessed 16 April 2026].

Bettiol, M. and Micelli, S. (2014), "The hidden side of design – The relevance of artisanship", in *Design Issues*, vol. 30, issue 1, pp. 7-18. [Online] Available at: doi.org/10.1162/DESI_a_00245 [Accessed 30 March 2026].

Boblin, S. L., Ireland, S., Kirkpatrick, H. and Robertson, K. (2013), "Using Stake's qualitative case study approach to explore implementation of evidence-based practice", in *Qualitative Health Research*, vol. 23, issue 9, pp. 1267-1275. [Online] Available at: doi.org/10.1177/1049732313502128 [Accessed 16 April 2026].

Booth, W. C., Colomb, G. G., Williams, J. M., Bizup, J. and FitzGerald, W. T. (2008), *The Craft of Research*, The University of Chicago Press, Chicago.

Bofylatos, S. (2022), "Upcycling Systems Design, Developing a Methodology through Design", in *Sustainability*, vol. 14, issue 2, article 600, pp. 1-18. [Online] Available at: doi.org/10.3390/su14020600 [Accessed 16 April 2026].

Cole, J. W. and Wolf, E. R. (1999), *The Hidden Frontier – Ecology and Ethnicity in an Alpine Valley*, University of California Press, Berkeley.

D'Olivo, P. and Karana, E. (2021), "Materials Framing – A Case Study of Biodesign Companies' Web Communications", in *She Ji | The Journal of Design, Economics, and Innovation*, vol. 7, issue 3, pp. 403-434. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.sheji.2021.03.002 [Accessed 30 March 2026].

Driscoll, D. L. (2011), "Introduction to primary research – Observations, surveys, and interviews", in Lowe, C. and Zemliansky, P. (eds), *Writing spaces – Reading on writing – Vol. 2*, Parlor Press, Anderson, pp. 153-174. [Online] Available at: wacclearinghouse.org/books/writingspaces2/writing-spaces-readings-on-writing-vol-2.pdf [Accessed 30 March 2026].

EMF – Ellen MacArthur Foundation (2025), *What is the meaning of a circular economy and what are the main principles?* [Online] Available at: ellenmacarthurfoundation.org/topics/circular-economy-introduction/overview [Accessed 30 March 2026].

European Parliament and Council of the European Union (2009), *Regulation (EC) No 1069/2009 laying down health rules as regards animal by-products and derived products not intended for human consumption*, document 32009R1069. [Online] Available at: eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/LSU/?uri=celex%3A32009R1069 [Accessed 16 April 2026].

Fischer, C. (2019), "Agriculture and tourism sector linkages – Global relevance and local evidence for the case of South Tyrol", in *Open Agriculture,* vol. 4, issue 1, pp. 544-553. [Online] Available at: doi.org/10.1515/opag-2019-0053 [Accessed 30 March 2026].

Gaddi, R. and Mastrolonardo, L. (2024), "Micro-reti locali per la transizione verde della filiera della lana | Local micro-networks for green transition of the wool supply chain", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 15, pp. 344-353. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/15292024 [Accessed 16 April 2026].

Geissdoerfer, M., Pieroni, M. P. P., Pigosso, D. C. A. and Soufani, K. (2020), "Circular business models – A review", in *Journal of Cleaner Production*, vol. 277, article 123741, pp. 1-17. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123741 [Accessed 16 April 2026].

Gershenfeld, N. (2012), "How to Make Almost Anything – The Digital fabrication revolution", in *Foreign Affairs*, vol. 91, issue 6, pp. 43-57. [Online] Available at: jstor.org/stable/41720933 [Accessed 30 March 2026].

Hofer, M., Hassan, M. and Mies, R. (2024), "The roles of makerspaces for facilitating open-source hardware development", in Moritz, M., Redlich, T., Buxbaum-Conradi, S. and Wulfsberg, J. P. (eds), *Global collaboration, local production – Fab City als Modell für Kreislaufwirtschaft und nachhaltige Entwicklung*, Springer Gabler. [Online] Available at: doi.org/10.1007/978-3-658-44114-2_17 [Accessed 16 April 2026].

IRP – International Resource Panel (2019), *Global Resources Outlook 2019 – Natural Resources for the Future We Want*, United Nations Environment Programme, Nairobi. [Online] Available at: resourcepanel.org/reports/global-resources-outlook-2019 [Accessed 30 March 2026].

Jakob, D. and Thomas, N. J. (2017), "Firing up craft capital: the renaissance of craft and craft policy in the United Kingdom", in *International Journal of Cultural Policy*, vol. 23, issue 4, pp. 495-511. [Online] Available at: doi.org/10.1080/10286632.2015.1068765 [Accessed 16 April 2026].

Karana, E., Barati, B., Rognoli, V. and Zeeuw van der Laan, A. (2015), "Material Driven Design (MDD) – A method to design for material experiences", in *International Journal of Design*, vol. 9, issue 2, pp. 35-54. [Online] Available at: ijdesign.org/index.php/IJDesign/article/view/1965 [Accessed 30 March 2026].

Klein, J. T. (1990), *Interdisciplinarity – History, theory and practice*, Wayne State University Press, Detroit.

Knapp, L. (2022), "The 'golden hoof' – The regeneration of regional wools", in *Fields | Journal of Huddersfield Student Research,* vol. 8, issue 1, pp. 1-13. [Online] Available at: doi.org/10.5920/fields.983 [Accessed 16 April 2026].

Maffei, S., Bolzan, P., Bianchini, M., Zeccara, F., Barbero, S., Campagnaro, C., Di Prima, N., Filippini, A., Puglielli, M., Rosato, L., Lotti, G. and Pontillo, G. (2024), "Svelare la complessità della transizione circolare per il settore del mobile imbottito | Unveiling the complexity of circular transition for the upholstered furniture sector", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 16, pp. 304-313. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/16252024 [Accessed 16 April 2026].

Mallik, A. (2025), "Unveiling sustainability's shadows through PESTEL analysis", in *Journal of Business, Ethics and Society*, vol. 5, issue 2, pp. 1-21. [Online] Available at: doi.org/10.61781/5-2II2025/1bmlm [Accessed 16 April 2026].

Manzini, E. (2015), *Design, When Everybody Designs – An Introduction to Design for Social Innovation*, MIT Press, Cambridge.

Manzini, E. and Vezzoli, C. (2003), "A strategic design approach to develop sustainable product service systems – Examples taken from the 'environmentally friendly innovation' Italian prize", in *Journal of Cleaner Production*, vol. 11, issue 8, pp. 851-857. [Online] Available at: doi.org/10.1016/S0959-6526(02)00153-1 [Accessed 30 March 2026].

Massari, S., Galli, F., Colombo, L. and Goretti, G. (2025), "Divinfood, NUCs e agrobiodiversità – Food Design Agile e Living Labs per l'innovazione sostenibile | Divinfood, NUCs and agrobiodiversity – Agile Food Design and Living Labs for sustainable innovation", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 17, pp. 398-411. [Online] Available at: doi.org/10.69143/2464-9309/17282025 [Accessed 16 April 2026].

Morpurgo, E. (2024), "Biomateriali e zone umide – Filiere per l'edilizia e il tessile dalla valorizzazione di ecosistemi locali | Biomaterials and wetlands – Supply chains for construction and textiles through the enhancement of local ecosystems", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 16, pp. 314-323. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/16262024 [Accessed 16 April 2026].

Olivastri, C. and Tagliasco, G. (2024), "Servizi per il riuso e il riparo – L'allestimento tra touchpoints e infrastrutture relazionali | Services for reuse and repair – The arrangement between touchpoints and relational infrastructures", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 15, pp. 324-331. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/15272024 [Accessed 16 April 2026].

Parisi, S., Rognoli, V. and Sonneveld, M. (2017), "Material Tinkering – An inspirational approach for experiential learning and envisioning in product design education", in *The Design Journal | An International Journal for All Aspects of Design*, vol. 20, issue supp. 1, pp. S1167-S1184. [Online] Available at: doi.org/10.1080/14606925.2017.1353059 [Accessed 30 March 2026].

Presidente della Repubblica Italiana (2016), "Legge 19 agosto 2016, n. 166 – Disposizioni concernenti la donazione e la distribuzione di prodotti alimentari e farmaceutici a fini di solidarietà sociale e per la limitazione degli sprechi (16G00179), in *Gazzetta Ufficiale*, Serie Generale n. 202 del 30/08/2016. [Online] Available at: gazzettaufficiale.it/eli/id/2016/08/30/16G00179/sg [Accessed 30 March 2026].

Provincia Autonoma di Bolzano (2024), *Rifiuti Alto Adige – 2024*. [Online] Available at: assets-eu-01.kc-usercontent.com/71daab00-137f-01d0-946b-d82e951fb8f4/865c0c62-9726-4634-baf0-4a87e9950b5b/Präsentation%20Abfalldaten%202024%20-%20Büroausgabe%20-%20Webseite%20ITA.pdf [Accessed 30 March 2026].

Rognoli, V. and Ayala-Garcia, C. (2021), "Defining the DIY-Materials approach", in Pedgley, O., Rognoli, V. and Karana, E. (eds), *Materials Experience 2 – Expanding Territories of Materials and Design*, Butterworth-Heinemann, Oxford, pp. 227-258. [Online] Available at: doi.org/10.1016/B978-0-12-819244-3.00010-7 [Accessed 30 March 2026].

Rognoli, V., Bianchini, M., Maffei, S. and Karana, E. (2015), "DIY Materials", in *Materials and Design*, vol. 86, pp. 692-702. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.matdes.2015.07.020 [Accessed 30 March 2026].

Santos Malaguti de Sousa, C., Queiroz Ferreira Barata, T., Dutra Profírio de Souza, C. and de Melo, F. G. (2023), "Urban Forest Management – Design-Driven Technology Pathways for the Valorization of Pruning Waste | Urban forests management – Design-driven technological routes for wood waste valuing", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 13, pp. 291-300. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/13252023 [Accessed 16 April 2026].

Schneider, A. (2022), "Land's Constraints and Possibilities – High-Altitude Farmers in the Eastern Alps", in *C&AFE | Culture, Agriculture, Food and Environment – The Journal of Culture & Agriculture*, vol. 44, pp. 18-26. [Online] Available at: doi.org/10.1111/cuag.12287 [Accessed 30 March 2026].

Sennett, R. (2008), *The Craftsman*, Yale University Press, New Haven.

Tanenbaum, J. G., Williams, A. M., Desjardins, A. and Tanenbaum, K. (2013), "Democratizing technology – Pleasure, utility and expressiveness in DIY and maker practice", in Bødker, S. Brewster, S., Baudisch, P., Beaudouin-Lafon, M. and Mackay, W. E. (eds), *CHI 2013 – Conference Proceedings – The 31st Annual CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, Paris, France, April 27-May 2, 2013*, Association for Computing Machinery, New York, pp. 2603-2612. [Online] Available at: dl.acm.org/doi/abs/10.1145/2470654.2481360 [Accessed 30 March 2026].

Ulluwishewa, R. (2014), "Environmental Unsustainability", in *Spirituality and Sustainable Development*, Palgrave Macmillan, London, pp. 103-114. [Online] Available at: doi.org/10.1057/9781137382764_9 [Accessed 30 March 2026].

UN – United Nations (2022), *Calling for Sustainable Development Goals Stimulus Package, Secretary-General Warns Finance Forum Window to Prevent Climate Catastrophe 'Is Fast Closing'*. [Online] Available at: press.un.org/en/2022/sgsm21614.doc.htm [Accessed 30 March 2026].

UN – United Nations (2015), *Transforming our world – The 2030 Agenda for Sustainable Development*. [Online] Available at: sdgs.un.org/2030agenda 2481360 [Accessed 30 March 2026].

Vezzoli, C. and Manzini, E. (2018), *Design for Environmental Sustainability*, Springer, London. [Online] Available at: doi.org/10.1007/978-1-84800-163-3 [Accessed 30 March 2026].

Zamenopoulos, T. and Alexiou, K. (2018), *Co-design as collaborative research*, Bristol University and AHRC Connected Communities Programme. [Online] Available at: oro.open.ac.uk/58301/1/Co-Design_CCFoundationSeries_PUBLISHED.pdf [Accessed 30 March 2026].

AGATHÓN – International Journal of Architecture, Art and Design | n. 19 | 2026 | pp. 432-449
ISSN print: 2464-9309 – ISSN online: 2532-683X | doi.org/10.69143/2464-9309/19252026

Article Info

Received	10 March 2026
Revised	13 April 2026
Accepted	21 April 2026
Published	30 June 2026

ANACARDO CIRCOLARE
Progetto centrato sulle persone per filiere circolari di produzione dell'anacardio

CASHEW IN-CYCLE
Human-centred design for circular cashew production chains

Camilo Ayala-Garcia, Carolina Perez Rodriguez, Clara Forero Lesmes, Tatiana Cruz Perea, Juan Sebastian Porras, Alejandro Maranon, Camilo Hernandez Acevedo, Oscar Álvarez Solano, Alicia Porras Holguín

Abstract

L'articolo presenta Jurui, un progetto 'centrato sulle persone' che affronta i principali nodi tecnologici della filiera dell'anacardio nella regione colombiana del Vichada. Inserita in un contesto segnato da risorse infrastrutturali limitate e da pratiche che impiegano strumenti autoprodotti, la ricerca integra sperimentazione materica, validazione tecnica e co-progettazione intervenendo sui residui del guscio di anacardio per trasformarli in materiali compositi e impiegarli per riprogettare un sistema di contenitori integrato con i macchinari per l'apertura della noce. Attraverso la prototipazione iterativa e prove sul campo il progetto ha evidenziato miglioramenti in termini di ergonomia, sicurezza, efficienza d'uso del materiale e continuità d'impiego dei contenitori nelle diverse fasi della raccolta e lavorazione della materia prima. L'esperienza mostra come la valorizzazione degli scarti, la realizzazione di strumenti locali e il rafforzamento delle competenze locali possano contribuire alla riorganizzazione dei sistemi agroindustriali.

This article presents Jurui, a human-centred design project addressing technological bottlenecks in the cashew production chain in Vichada, Colombia. Operating in a context of informal adaptation and limited infrastructure, the research integrates material experimentation, engineering validation, and participatory design. Cashew shell residues were transformed into composite materials and applied to the redesign of a basket system integrated with nut-opening machinery. Through iterative prototyping and field testing, improvements were observed in ergonomics, safety, material efficiency, and workflow continuity. The project demonstrates how waste valorisation, decentralised manufacturing, and community capacity building can reorganise agro-industrial systems.

Keywords

design centrato sulle persone, valorizzazione degli scarti agroindustriali, design sistemico circolare, co-progettazione, multidisciplinarietà

human-centred design, agro-waste valorisation, circular systemic design, co-creation, multidisciplinary development

Camilo Ayala-Garcia, Researcher, Free University of Bozen-Bolzano (Italy).

Carolina Perez Rodriguez, Research Assistant, Universidad de los Andes (Colombia).

Clara Ligia Forero Lesmes, Research Assistant, Universidad de los Andes (Colombia).

Tatiana Cruz Perea, PhD Candidate, Universidad de los Andes (Colombia),

Juan Sebastian Porras, Research Assistant, Universidad de los Andes (Colombia).

Alejandro Maranon, Associate Professor, Universidad de los Andes (Colombia).

Camilo Hernández Acevedo, Associate Professor, Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito (Colombia).

Óscar Álvarez Solano, Associate Professor, Universidad de los Andes (Colombia).

Alicia Porras Holguín, Associate Professor, Universidad de los Andes (Colombia).

I sistemi agroindustriali localizzati in aree rurali e periferiche operano spesso in contesti segnati da una dotazione tecnologica limitata, dall'impiego di soluzioni tecniche auto-prodotte e da una ridotta disponibilità di strumenti e infrastrutture conformi a standard consolidati. In molte aree del 'Sud globale' (Bull and Banik, 2025) la trasformazione dei prodotti agricoli si basa su macchinari assemblati o modificati localmente e su utensili trasferiti da altri settori produttivi, in assenza di un effettivo sviluppo progettuale, di procedure di certificazione e di adeguate verifiche ergonomiche, il che riflette disuguaglianze più ampie nelle capacità tecnologiche e nello sviluppo industriale rispetto ad altri Paesi (Bell and Pavitt, 1993). Ne derivano una produttività ridotta, un aumento dei rischi per i lavoratori e una tendenziale concentrazione delle fasi a maggiore valore aggiunto al di fuori della regione, poiché attività come confezionamento, logistica di trasporto e commercializzazione finale sono spesso svolte da attori esterni al contesto locale (Goyal, Hickel and Jha, 2025).

Nella regione del Vichada, nel sud-est della Colombia, la situazione produttiva riflette queste dinamiche. Negli ultimi anni la produzione di anacardio è cresciuta in modo significativo, sostenuta da programmi nazionali e regionali che hanno incentivato la diversificazione agricola (Roman Hoyos and Arango Wiesner, 2007; Orduz-Rodríguez and Rodríguez-Polanco, 2022). L'anacardio è stato promosso come coltura strategica per la regione dell'Orinoquía grazie alla sua capacità di tollerare la siccità e di adattarsi a suoli poco fertili (Arango Wiesner et alii, 2016; León, 2020). All'aumento delle superfici coltivate non è tuttavia seguito un analogo avanzamento tecnologico della filiera di trasformazione: l'apertura della noce, la separazione del guscio e la gestione del liquido del guscio dell'anacardio (CNSL) restano operazioni prevalentemente manuali (Fig. 1).

Lungo l'intera filiera gli strumenti di lavoro sono spesso improvvisati o adattati da ambiti produttivi diversi. I dispositivi per l'apertura delle noci derivano spesso da utensili da taglio riadattati, gli impianti di cottura si basano su processi termici artigianali – adottati anche in relazione alla domanda di prodotto trattato termicamente, particolarmente rilevante in alcuni mercati di destinazione, fra cui quello europeo – e i contenitori per lo stoccaggio sono in plastica di bassa qualità che, in condizioni di clima tropicale, si degrada rapidamente (Fig. 2). Sebbene tali adattamenti testimonino l'ingegnosità locale, vengono di norma sviluppati senza standard di sicurezza né criteri ergonomici. Ciò espone gli operatori a rischi rilevanti, tra cui ustioni chimiche da CNSL, lesioni da sovraccarico ripetuto ed esposizione ai fumi di combustione (Fig. 3).

Studi condotti in altre aree in cui si lavora l'anacardio hanno documentato danni cutanei ed effetti negativi di lungo periodo sulla salute dei lavoratori coinvolti nella sgusciatura manuale (Andonaba et alii, 2017); inoltre le proprietà corrosive del CNSL sono ampiamente documentate in letteratura (Mazzetto, Lomonaco and Mele, 2009; Oliveira et alii, 2020), il che rafforza l'urgenza di ridurne l'esposizione diretta. I citati limiti tecnologici incidono anche sulla produttività e sulla qualità del prodotto: meccanismi di apertura mal calibrati e sistemi di separazione inefficienti danneggiano il seme della noce di anacardio, riducendone la qualità commerciale, mentre processi di cottura non controllati possono causare fratture del seme e un rilascio disomogeneo dell'olio.

Al tempo stesso sottoprodotti di valore come i gusci e le ceneri rimangono spesso sottoutilizzati, nonostante il loro potenziale nell'ambito dei materiali compositi e delle applicazioni con materiali a base biologica (Patel, Bandyopadhyay and Ganesh, 2006; Yuliana et alii, 2012; Prakash et alii, 2018; Harini et alii, 2018). L'insieme di rischi per la sicurezza, sprechi di materiale e scarsa integrazione delle più elementari tecnologie costituisce una criticità nella catena di valore dell'anacardio e richiede una rilettura critica dell'intera filiera, anziché interventi puntuali e isolati (Gaddi and Mastrolonardo, 2024).

Studi recenti inquadrano i sistemi produttivi basati sugli adattamenti tecnologici come reti socio-tecniche complesse che richiedono approcci di design sistemico (Barbero and Ferrulli, 2023; Maffei et alii, 2024). In questo dibattito il design è sempre più riconosciuto come motore delle transizioni circolari attraverso la valorizzazione degli scarti e la costruzione di sistemi produttivi radicati localmente (Santos Malaguti de Sousa et alii, 2023), mentre l'innovazione materica assume valore non solo in rapporto alle prestazioni tecniche, ma anche alla percezione e all'uso (Del Curto et alii, 2022; Pedgley, Rognoli and Karana, 2016; Karana, Hekkert and Kandachar, 2009).

Nonostante la crescente attenzione al design circolare[1], all'ergonomia nei processi agroindustriali e all'appropriazione della tecnologia (Vacanti and Leonardi, 2024) gli studi disponibili tendono ancora a trattare separatamente materiali, processi e strumenti. Rimangono limitate le ricerche che esplorano come uno strumento impiegato all'interno di un sistema agroindustriale possa agire da connettore sistemico tra fattori umani (intesi in senso ergonomico, operativo e prestazionale), valorizzazione dei residui materiali e produzione delocalizzata.

Il presente contributo affronta questa lacuna proponendo, nell'ambito del progetto Jurui[2], un approccio interdisciplinare guidato dal design applicato alla filiera dell'anacardio nella regione del Vichada, attraverso un protocollo replicabile per individuare e riprogettare gli strumenti critici del sistema, con l'obiettivo di migliorare la sicurezza, la continuità operativa e la produzione locale. Il testo è articolato come segue: dopo aver riportato il contesto e lo stato dell'arte, il paper individua i punti critici del progetto, presenta la metodologia e illustra le fasi della ricerca e di validazione; la sezione finale discute limiti, trasferibilità e implicazioni.

Il contributo si colloca nel campo del design per la sostenibilità (Vezzoli, 2018; Manzini, 2015), all'interno del quale il progetto oltrepassa la sola dimensione del prodotto per includere processi collaborativi, la costruzione di scenari e la resilienza della filiera produttiva (Morpurgo, 2024; Gaddi and Mastrolonardo, 2024). La sua originalità risiede nell'integrare, in un unico intervento, la valorizzazione degli scarti, la riprogettazione ergonomica di un oggetto, l'ottimizzazione della produzione e dei saperi locali, riformulando il design circolare come condizione relazionale e infrastrutturale incorporata nei sistemi produttivi.

Inoltre il progetto mira a valorizzare e potenziare il sapere locale, anziché sostituire le pratiche esistenti con processi industriali importati: attraverso workshop di co-progettazione, attività di 'cartografia sociale' – intesa come costruzione condivisa di mappe del territorio e delle pratiche locali a partire dallo sguardo della comunità – e osservazione diretta, il gruppo di ricerca ha potuto attivare sinergie tra gli attori del sistema agroindustriale, designer e ingegneri (Moore and Garzón, 2010; Sanders and Stappers, 2008). La sperimentazione sui materiali e la validazione del progetto sono state condotte in modo iterativo, così da mantenere gli interventi tecnicamente fattibili e al contempo socialmente radicati.

Individuazione dei punti critici nella filiera | Le ricerche condotte sul campo nella regione del Vichada hanno mostrato che molti degli strumenti e dei sistemi di supporto impiegati lungo la filiera dell'anacardio derivano da adattamenti di oggetti provenienti da altri settori. Contenitori per bevande, lattiero-caseari, di plastica per la frutta e altri contenitori generici venivano riutilizzati per raccogliere le noci e trasportarle fino ai macchinari di lavorazione, stoccare i gusci già aperti o mettere a dimora le piantine nelle prime fasi di crescita (Fig. 4). Queste soluzioni versatili attestano una notevole capacità locale di risolvere problemi e di riuso dei materiali; nello stesso tempo mettono però in evidenza la presenza di carenze tecnologiche nella produzione di anacardio.

Benché tali adattamenti dimostrino l'ingegno e la resilienza della popolazione locale la ricerca sui sistemi agroindustriali informali mostra che strumenti non adatti tendono ad aumentare i rischi per la salute degli operatori e a ridurre l'efficienza produttiva di processo (Battini et alii, 2011; Dianat et alii, 2020; Rainbird and O'Neill, 1995). Nella regione del Vichada l'assenza di attrezzature specifiche ha comportato discontinuità dei piani di lavoro, il sollevamento di pesi ad altezze eccessive, distribuzioni irregolari dei carichi e inadeguatezza dei contenitori, tutti fattori che incidono direttamente sulla postura e sui movimenti degli operatori.

Osservazioni sul campo e interviste partecipate hanno documentato frequenti flessioni, torsioni e posture innaturali prolungate durante la raccolta, la tostatura, l'apertura delle noci e la separazione dei gusci (Fig. 5). I lavoratori hanno riferito di lombalgie croniche, affaticamento delle spalle e stanchezza fisica al termine di lunghe giornate di lavoro, sintomi coerenti con quanto rilevato in altri settori agroindustriali di piccola scala, dove il lavoro manuale ripetitivo e strumenti mal concepiti contribuiscono a dolori muscolo-scheletrici (Fathallah, 2010; ILO, 2011). In particolare le attività di trasformazione della noce implicano contrazioni muscolari ripetute e con sforzi elevati, utilizzo improprio di dispositivi di taglio, prolungata esposizione al calore e posizioni innaturali del polso, tutti fattori di rischio ergonomico riconosciuti in letteratura (Bao and Silverstein, 2005). Nel caso dell'anacardio, tali sollecitazioni fisiche sono aggravate dall'esposizione al Cashew Nutshell Liquid (CNSL), con un aumento congiunto del rischio per la salute dei lavoratori, come rilevato personalmente dal gruppo di ricerca.

I contenitori utilizzati non avevano una geometria che ne favorisse l'impilamento e ne agevolasse lo stoccaggio e il trasporto, soprattutto nei contesti tipici del bacino dell'Orinoco in cui il trasporto è fluviale. Piuttosto che liquidare tali condizioni come soluzioni inadeguate o informali il progetto le ha assunte come evidenze critiche di un'autonoma capacità tecnologica locale (Brennan and Luloff, 2007) e le ha analizzate come prototipi già in uso, ossia come soluzioni locali adattate a una condizio-



Fig. 1 | Manual opening of cashew nuts in the department of Vichada, illustrating direct contact with Cashew Nut Shell Liquid (CNSL) under traditional processing conditions (credit: Jurui Project, 2022).

Next page

Figg. 2, 3 | Improvised tools for cashew nut opening, adapted from other industrial sectors; Occupational risks associated with manual cashew processing, including exposure to CNSL and transformation residues (credits: Jurui Project, 2022).

ne di risorse esigue. Questa prospettiva è coerente con gli studi sul design per la sostenibilità (Vezzoli, 2018) e sulle tecnologie appropriate (Vacanti and Leonardi, 2024), secondo cui l'innovazione nelle regioni periferiche del mondo dovrebbe partire dal riconoscimento e dal perfezionamento delle pratiche esistenti, più che dalla loro sostituzione integrale (Smith, Fressoli and Thomas, 2014).

Attraverso workshop di co-progettazione, mappature del contesto partecipate e osservazione diretta, il gruppo di ricerca ha potuto attivare sinergie tra gli attori del sistema agroindustriale e designer e ingegneri (Massari et alii, 2025). Tali attività hanno reso possibile l'identificazione e l'analisi degli strumenti autoprodotti, acquisendone funzioni, capacità di carico, configurazioni ergonomiche e durabilità dei materiali (Fig. 6). Questa mappatura ha permesso di individuare specifici ambiti di intervento lungo la filiera, con particolare riferimento agli strumenti di supporto alla raccolta, ai contenitori destinati al trasporto dei gusci, ai dispositivi impiegati per regolare l'altezza del piano di lavoro e ai sistemi modulari di impilamento dei contenitori. Ciascuna criticità è stata quindi analizzata in rapporto ai profili di sicurezza, efficienza operativa e integrazione con le successive fasi di trasformazione.

Metodologia: protocollo di ricerca e replicabilità | Adottando un protocollo interdisciplinare guidato dal design, che combina osservazione sul campo, co-progettazione, sperimentazione materica, validazione tecnica e prove in situ, la ricerca è stata articolata in sei fasi: 1) mappatura della filiera dell'anacardio e individuazione dei colli di bottiglia ergonomici e operativi; 2) documentazione e classificazione degli strumenti adattati localmente mediante osservazione e workshop; 3) sperimentazione sui materiali a partire dai residui del guscio di anacardio; 4) co-progettazione interdisciplinare integrando design, ingegneria meccanica e ingegneria chimica; 5) prototipazione iterativa e validazione basata su simulazioni; 6) prove sul campo in condizioni reali di produzione.

I partecipanti sono stati selezionati in base al loro coinvolgimento nella filiera e ai ruoli tecnici ricoperti nel progetto[3]. I casi di sperimentazione sono stati definiti in relazione alla loro ricorrenza nelle diverse fasi produttive e alla loro rilevanza per il rischio ergonomico e l'inefficienza dei flussi di lavoro. I dati raccolti hanno incluso osservazioni, feedback degli utenti, prestazioni dei prototipi e risultati delle simulazioni. Le prove si sono concentrate su capacità di carico (circa 10 kg), ergonomia, controllo dello sversamento del prodotto, resistenza strutturale e compatibilità con i macchinari. Il confronto con i contenitori esistenti è stato condotto attraverso una valutazione prestazionale di carattere qualitativo e applicativo (Tab. 1); la replicabilità del protocollo risiede proprio in questa sequenza di fasi, pur restando gli esiti dipendenti dal contesto.

Il gruppo di lavoro ha condotto sperimentazioni di laboratorio utilizzando residui del guscio di anacardio (particelle e ceneri), combinati con polimeri biodegradabili, quali il PLA. I compositi ottenuti hanno mostrato maggiore rigidezza e stabilità, risultando idonei a processi di stampaggio a iniezione e a compressione (Fig. 7), in coerenza con la letteratura sui riempitivi lignocellulosici (Bogoeva-Gaceva et alii, 2007; Azwa et alii, 2013).

Questo passaggio ha spostato la ricerca dall'esplorazione materica all'applicazione sistemica; la mappatura della filiera ha evidenziato che i contenitori sono un elemento ricorrente nelle fasi di raccolta, trasporto, trasformazione, essiccazione e coltivazione (Fig. 8), configurandoli come veri e propri connettori infrastrutturali. I contenitori esistenti, spesso semplici recipienti in plastica riadattati, erano tuttavia privi di qualità ergonomiche, di durabilità strutturale e di compatibilità con i processi produttivi, contribuendo a inefficienze, perdite di materiale e affaticamento degli operatori (Neumann, Ekman and Winkel, 2009).

Il contenitore è stato quindi individuato come punto strategico di intervento; invece di introdurre nuovi dispositivi il progetto ha applicato il composito sviluppato alla riprogettazione dei contenitori. In coerenza con i principi del Material Driven Design e dei materiali autoprodotti (Karana et alii, 2015; Rognoli et alii, 2015) le proprietà del materiale hanno orientato lo sviluppo di contenitori modulari, impilabili ed ergonomicamente adattati alle attività della filiera. Tali elementi operano come infrastrutture minute capaci di migliorare la distribuzione del carico, ridurre l'esposizione al CNSL e integrarsi con i macchinari per l'apertura delle noci sviluppati nel progetto.

La ricerca si è articolata in tre linee interconnesse: 1) sviluppo di materiali compositi a partire dai residui dell'anacardio; 2) progetto di un sistema di contenitori orientato all'ergonomia, alla sicurezza e ai flussi operativi; 3) sviluppo di macchinari per l'apertura delle noci, finalizzati a minimizzare il contatto con il CNSL (Ayala-Garcia et alii., 2025). Sebbene reciprocamente dipendenti, in questo articolo l'attenzione si concentra sulla seconda linea, assumendo la cassetta come artefatto specifico del sistema all'interno della filiera.

Processo progettuale integrativo e co-progettazione | Il design svolge un ruolo centrale nell'integrazione tra lo sviluppo dei materiali, gli aspetti chimico-fisici della materia prima e le competenze della comunità. Più che configurarsi come un semplice segmento nello sviluppo di soluzioni tecniche, il progetto ha agito come quadro di mediazione, rendendo possibile il dialogo tra le discipline e tra la sperimentazione di laboratorio e la realtà territoriale (Barbero and Ferrulli, 2023). Sono stati organizzati workshop con esperti di ingegneria meccanica, ingegneria chimica e design per individuare requisiti, vincoli prestazionali e soluzioni possibili (Fig. 9); queste sessioni hanno allineato criteri di prestazione strutturale, limiti di processo, considerazioni ergonomiche e disponibilità dei materiali in una strategia di sviluppo coerente.

Lo scambio interdisciplinare ha consentito a ciascuna disciplina di esplicitare i propri presupposti: gli ingegneri meccanici hanno definito i requisiti di portanza, di resistenza all'impilamento e i parametri di fabbricabilità; gli ingegneri chimici hanno contribuito con soglie di compatibilità dei materiali, temperature di processo, limiti compositivi dei materiali a base di guscio di anacardio e criteri per l'isolamento della componente corrosiva del CNSL; i designer hanno tradotto tali vincoli tecnici in forma, ergonomia e sistema, assicurando che l'oggetto potesse funzionare entro i ritmi delle pratiche produttive quotidiane, integrarsi con i sistemi di apertura meccanica e consentire agli operatori di lavorare in condizioni ergonomicamente sicure.

Attraverso discussioni iterative e prototipazione rapida, il contenitore è progressivamente emerso come oggetto specifico del sistema. Il gruppo di lavoro ha convenuto che non potesse essere sviluppato come generico contenitore agroindustriale, ma che dovesse essere progettato esplicitamente per la filiera dell'anacardio nella regione del Vichada. Il suo sviluppo è avvenuto a partire dall'osservazione diretta delle fasi di raccolta, tostatura, essiccazione e confezionamento nella regione:

il contenitore è stato quindi inteso non come artefatto isolato, ma come elemento infrastrutturale capace di connettere il flusso dei materiali, il movimento degli operatori e le logiche di stoccaggio (Fig. 10).

Le pratiche locali hanno avuto un ruolo decisivo nella definizione del progetto; gli operatori delle fasi di coltivazione e di lavorazione modificavano spesso i contenitori di plastica, tagliando i pannelli laterali per migliorare la ventilazione, rinforzando le basi per evitare fessurazioni, rivestendo l'interno per evitare di danneggiare l'anacardo, oppure adattando le maniglie per migliorare la presa. Questi interventi informali hanno rivelato una competenza progettuale incorporata nelle pratiche d'uso quotidiane (Fig. 11) e il progetto la ha reinterpretata come caratteristiche formali del nuovo artefatto: le asole di ventilazione sono state dimensionate e posizionate in funzione delle esigenze di essiccazione; la geometria delle maniglie è stata adattata per ridurre lo sforzo del polso, mantenendo la mano il più possibile lontana dai gusci aperti e dal relativo liquido; lo spessore delle pareti è stato calibrato per aumentare resistenza e durabilità minimizzando il peso; l'impilamento è stato riprogettato per meglio distribuire i carichi verticali durante il trasporto (Fig. 12).

Risultati: caratteristiche ed evoluzione della cassetta | Attraverso la prototipazione iterativa e le prove sul campo è stato progressivamente definito un insieme di requisiti funzionali ed ergonomici: il contenitore è stato progettato per contenere circa 10 kg di noci di anacardio, in linea con le soglie di movimentazione manuale in grado di bilanciare efficienza e riduzione dello sforzo fisico; tale capacità è stata verificata mediante prove dirette con gli operatori.

È risultata inoltre essenziale la compatibilità con i macchinari di apertura e separazione sviluppati in parallelo (Fig. 13). La geometria del contenitore è stata calibrata per allinearsi alle altezze dei macchinari e dei sistemi di raccolta, così da rendere continuo il flusso operativo e ridurre i passaggi di movimentazione. Un ulteriore requisito chiave riguardava lo sversamento controllato: la geometria del bordo e l'inclinazione delle pareti sono state ottimizzate per consentire uno scarico fluido del prodotto nei macchinari, riducendo la dispersione laterale e la caduta di noci al di fuori dei macchinari (Fig. 14). Una forma simmetrica ha assicurato una distribuzione equilibrata del peso, migliorando la stabilità e riducendo i movimenti compensativi e il contatto con il CNSL.

Il disegno ergonomico delle maniglie è stato affinato in termini di curvatura, spessore e posizione per ridurre l'affaticamento della mano e movimenti









impropri del polso durante le attività ripetitive. Anche la resistenza strutturale è risultata migliorata e le aperture di ventilazione sono state concentrate alla base per semplificare la fabbricazione, migliorare il passaggio d'aria nelle fasi di essiccazione e ridurre l'impiego di materiale mantenendo la stabilità (Fig. 15). La compatibilità con i 'tubetes' per le piantine[4] ha esteso la funzione del contenitore anche alla fase di coltivazione, rafforzandone il ruolo sistemico lungo l'intera filiera (Fig. 16).

Sono stati sviluppati prototipi a bassa e ad alta risoluzione, i primi dei quali, in cartone, MDF e componenti stampati in 3D, sono stati utilizzati per verificare proporzioni, logiche di impilamento e modalità di interazione. Gli operatori hanno interagito direttamente con questi modelli, consentendo di osservare prese, posture e modalità di movimentazione, il tutto supportato da documentazione fotografica e da analisi di mappatura posturale (Fig. 17).

I prototipi ad alta risoluzione sono stati quindi testati in condizioni reali, comprese attività ripetute di sollevamento, impilamento e integrazione con i macchinari, e capacità di carico, resistenza agli urti e durabilità sono state valutate mediante prove controllate che simulavano l'uso quotidiano (Fig. 18). La validazione sul campo ha coinvolto operatori attivi nelle diverse fasi della produzione; il confronto con i contenitori esistenti ha evidenziato una riduzione della dispersione di anacardi durante lo svuotamento nei macchinari, una maggiore stabilità e una migliore integrazione tra le fasi di trasformazione, essiccazione e coltivazione (Fig. 19).

Integrazione ingegneristica e strategia di fabbricazione | Un processo iterativo di confronto con il team di ingegneria meccanica ha introdotto simulazioni strutturali finalizzate a ottimizzare la geometria della cassetta. L'analisi agli elementi finiti è stata utilizzata per valutare la distribuzione delle tensioni sotto carico (10 kg), in condizioni di impilamento e in caso di urto, orientando modifiche allo spessore delle pareti, alla disposizione delle nervature e al rinforzo della base. Un vincolo decisivo riguardava il mantenimento della fabbricabilità entro un quadro tecnologico a bassa complessità (Fig. 20). Anziché fare affidamento esclusivo su una produzione industriale centralizzata, il progetto ha esplorato strategie di fabbricazione distribuita compatibili con le capacità regionali. Strumenti di fabbricazione digitale, sistemi modulari di stampi e documentazione open source per la produzione sono stati valutati come dispositivi per ridurre le barriere di accesso e aumentare la riproducibilità.

Workshop e mappature tecniche hanno rivelato una gamma ampia di competenze presenti nel territorio, tra cui riparazione meccanica, saldatura, falegnameria e piccola fabbricazione; officine per la riparazione di motocicli, laboratori per la manutenzione di attrezzi agricoli e spazi informali di fabbricazione hanno mostrato competenze tecniche mobilitabili per la produzione degli stampi, la manutenzione delle attrezzature e la manifattura in piccole serie. Ciò ha orientato la strategia progettuale verso la fabbricabilità distribuita, rendendo possibile un'innovazione radicata localmente e sostenibile (Vacanti and Leonardi, 2024).

Prototipazione, validazione e attuazione circolare | I prototipi finali del prodotto sono stati realizzati mediante tecniche di fabbricazione additiva, in particolare la stampa 3D, per validarne la precisione geometrica, il comportamento strutturale e l'integrazione con i macchinari di apertura e separazione sviluppati in precedenza. Le prove sono state condotte parallelamente ai prototipi meccanici per valutare la continuità del flusso operativo, il trasferimento dei carichi tra una fase e l'altra e la compatibilità con i sistemi di raccolta dei gusci (Fig. 21).

Oltre alla prototipazione fisica il progetto ha incorporato un processo strutturato di trasferimento di conoscenze e rafforzamento delle competenze, essenziale per consentire a piccole infrastrutture e micro-reti territoriali nella regione del Vichada di avviare transizioni verdi (Gaddi and Mastrolonardo, 2024). Gli sviluppi tecnologici sono stati presentati ai membri della comunità per valutarne l'interesse, la fattibilità dell'adozione e il potenziale di produzione locale. Le sessioni di restituzione hanno permesso ai partecipanti di discutere dei benefici percepiti e delle criticità operative, assicurando che le strategie di implementazione fossero coerenti con le condizioni locali.

È stata istituita una collaborazione formale con il Centro Regionale di Formazione Professionale SENA (SErvicio Nacional de Aprendizaje) che si è impegnato a sostenere la formazione tecnica relativa all'uso dei macchinari, al trattamento dei materiali compositi e ai metodi di fabbricazione digitale. I moduli formativi sono stati progettati per affrontare sia la sicurezza operativa sia le competenze di pro-









Fig. 4 | Reused plastic baskets used for the cultivation, collection, and transport of cashew nuts along the production chain (credit: Jurui Project, 2023).

Next page

Fig. 5 | Working postures observed during cashew nut opening and shell separation operations (credit: Jurui Project, 2022).

Fig. 6 | Community workshop applying the Design Thinking AEIOU framework to categorise improvised tools and containers used across the cashew production chain (credit: Jurui Project, 2022).

duzione, così da consentire agli attori locali di mantenere e replicare i sistemi sviluppati. Piani di produzione aperti e documentazione tecnica sono stati predisposti per facilitare la fabbricazione decentrata e ridurre la dipendenza da fornitori esterni.

Per sostenere la valutazione qualitativa del sistema proposto, è stato condotto un confronto tra i contenitori adattati già in uso e quelli riprogettati (Tab. 2). Il confronto è stato effettuato sulla base di parametri operativi chiave, tra cui il numero di passaggi di movimentazione, la caduta del prodotto durante lo sversamento nei macchinari, il carico ergonomico e la continuità del flusso di lavoro. Sebbene lo studio non si fondi su misurazioni controllate, le osservazioni sul campo e le prove ripetute indicano una riduzione delle perdite di materiale, un miglioramento delle condizioni di movimentazione dei carichi e una maggiore continuità tra le fasi produttive. Tali risultati suggeriscono che l'intervento contribuisce non solo all'efficienza operativa, ma anche al miglioramento delle condizioni di lavoro e alla riduzione dei rischi associati alla movimentazione manuale e al contatto con il CNSL.

Limiti e trasferibilità | Questa ricerca presenta diversi limiti. Lo studio si basa su un unico caso territoriale e i risultati sono quindi condizionati dalle specifiche condizioni socioeconomiche, ambientali e infrastrutturali della regione del Vichada. La valutazione del sistema proposto si fonda prevalentemente su osservazioni qualitative e applicative, più che su dati quantitativi a lungo periodo. Inoltre la durabilità del materiale sviluppato e l'adozione prolungata degli strumenti proposti richiedono ulteriori verifiche in condizioni operative estese.

Oltre a questi limiti la diffusione dell'approccio incontra varie barriere: sul piano culturale pesano pratiche consolidate e resistenza a modificare strumenti familiari e sul piano economico incide l'accesso limitato a investimenti, attrezzature e mercati stabili per soluzioni prodotte localmente. Le barriere logistiche e infrastrutturali sono legate all'isolamento geografico della regione, che condiziona l'accesso ai materiali, alla manutenzione e alle reti di distribuzione, soprattutto in assenza di una chiara filiera alternativa locale (Gaddi and Mastrolonardo, 2024). Anche i fattori normativi e istituzionali possono influenzare l'implementazione, in particolare in relazione agli standard di sicurezza, alla certificazione e al sostegno ai sistemi produttivi decentrati; tali ostacoli sono coerenti con le criticità individuate dalla letteratura sulle tecnologie appropriate (Vacanti and Leonardi, 2024) e sui sistemi di innovazione rurale.

La trasferibilità della ricerca risiede soprattutto nell'approccio metodologico, più che nella mera replicazione del contenitore sviluppato. Il protocollo, fondato sulla mappatura delle filiere produttive, sull'individuazione di strumenti ricorrenti, sull'integrazione dei saperi locali e sulla combinazione di design, ingegneria e sviluppo dei materiali, può essere adattato ad altri sistemi agroindustriali, in particolare nei contesti periferici del Sud globale (Bull and Banik, 2025). La sua applicazione dipende in larga misura dalla capacità del gruppo di progetto di strutturare una collaborazione tra ingegneri, scienziati e istituzioni governative; tuttavia questa ricerca dimostra che tale collaborazione è praticabile. La configurazione specifica di strumenti, strategie di valorizzazione dei materiali e processi di fabbricazione deve comunque essere ridefinita in base alle pratiche culturali locali, alle capacità tecniche e alle condizioni infrastrutturali.

Contributo agli SDG: sinergie e compromessi | Il progetto Jurui contribuisce in primo luogo agli Obiettivi di Sviluppo Sostenibile (SDG) 9 e 10 attraverso l'elaborazione di soluzioni tecnologiche con-











Fig. 7 | Laboratory experiments combining cashew shell residues with biodegradable polymers to develop composite materials (credit: Jurui Project, 2023).

Next page

Fig. 8 | Mapping of the cashew production chain highlighting the recurrent use of baskets and containment systems (credit: Jurui Project, 2023).

Fig. 9 | Interdisciplinary workshops involving design, mechanical engineering, and chemical engineering teams to define shared technical requirements (credit: Jurui Project, 2023).

testuali, a bassa complessità, integrate nella filiera dell'anacardio. In relazione all'SDG 9 la ricerca promuove l'innovazione decentrata introducendo strumenti e materiali fabbricabili localmente, capaci di ridurre la dipendenza da infrastrutture industriali centralizzate. In relazione all'SDG 10 il progetto contribuisce alla riduzione delle disuguaglianze ampliando le possibilità di partecipazione all'interno della catena del valore. Attraverso processi di coprogettazione, il rafforzamento delle competenze e la collaborazione con le Istituzioni locali la ricerca favorisce l'accesso a conoscenze tecniche e capacità produttive, permettendo agli attori locali di agire non solo come utilizzatori, ma anche come produttori e manutentori del sistema.

Il progetto genera inoltre sinergie indirette con altri SDG. Sostiene l'SDG 12 attraverso la valorizzazione dei residui agroindustriali, trasformati da scarto a nuova risorsa materiale mediante approcci riconducibili al Material Driven Design e ai DIY Materials (Del Curto et alii, 2022; Rognoli et alii, 2015), e attraverso la riduzione delle perdite di prodotto lungo le fasi di trasferimento e lavorazione; contribuisce inoltre all'SDG 8 migliorando le condizioni di lavoro e riducendo i rischi dovuti all'assenza di adeguati requisiti ergonomici. L'implementazione di approcci di questo tipo comporta però anche alcuni compromessi; il ricorso alle capacità locali richiede un supporto istituzionale continuo e può incontrare vincoli legati all'integrazione nel mercato, alla certificazione e alla conformità normativa. Tali tensioni evidenziano la necessità di bilanciare accessibilità, prestazioni e scalabilità nella progettazione di sistemi agroindustriali circolari e inclusivi.

Discussione e conclusioni | Questa ricerca mostra come il design può aggiungere valore ai sistemi agroindustriali, soprattutto nei contesti in cui pratiche informali, limiti infrastrutturali e inadeguatezza di strumenti e materiali condizionano la produzione. Attraverso l'osservazione sul campo, la sperimentazione materica, la validazione tecnica e i processi partecipativi lo studio ha identificato nel contenitore un punto di intervento strategico all'interno della filiera dell'anacardio; il nuovo contenitore ha migliorato le condizioni ergonomiche, ridotto le perdite di prodotto, rafforzato la continuità operativa e consentito una migliore integrazione con i macchinari di trasformazione.

Oltre a questi esiti operativi il principale contributo della ricerca risiede nel suo posizionamento metodologico e teorico. Invece di affrontare separatamente materiali, strumenti e processi, lo studio propone un approccio guidato dal design in cui un singolo artefatto viene riformulato come elemento infrastrutturale capace di connettere i fattori umani, i flussi materiali e i sistemi produttivi. In questo senso la circolarità non è trattata come semplice proprietà del materiale, bensì come una condizione sistemica che emerge dall'allineamento tra tecnologie, pratiche e capacità locali.

I risultati sottolineano inoltre l'importanza di abbassare le soglie tecnologiche; privilegiando soluzioni fabbricabili localmente, documentazione aperta e collaborazione con gli attori regionali, il progetto sostiene un passaggio dalla dipendenza da sistemi industriali centralizzati a modelli produttivi distribuiti e sensibili al contesto. Tale impostazione contribuisce al dibattito in corso sulle tecnologie appropriate, sul design circolare e sull'innovazione agroindustriale nel Sud globale. Al tempo stesso, la ricerca presenta alcuni limiti: lo studio si basa su un caso territoriale specifico e la valutazione si fonda prevalentemente su osservazioni qualitative, più che su dati quantitativi di lungo periodo. La durabilità del materiale e la stabilità dell'adozione del sistema richiedono ulteriori verifiche nel tempo.

La trasferibilità della ricerca risiede soprattutto nella sua impalcatura metodologica: il protocollo si fonda sulla mappatura delle filiere, sull'individuazione di strumenti ricorrenti e sull'integrazione tra design, ingegneria e saperi locali; per questo può essere adattato ad altri sistemi agroindustriali. La sua applicazione dipende tuttavia dalle pratiche culturali locali, dalle capacità tecniche e dalle condizioni infrastrutturali e richiede quindi una reinterpretazione contestuale, non una semplice replica diretta.

Gli sviluppi futuri dovrebbero concentrarsi sulla valutazione di lungo periodo delle prestazioni di materiali e strumenti, sull'affinamento delle strategie di fabbricazione locale e sulla verifica degli impatti socioeconomici, inclusi la diversificazione del reddito, la riduzione dei rischi occupazionali e il rafforzamento delle capacità locali. Nel complesso la ricerca contribuisce al dibattito scientifico mostrando che la trasformazione sistemica dei contesti agroindustriali può essere attivata attraverso interventi di design mirati e sensibili al contesto.

Agro-industrial systems in rural and peripheral regions often operate under conditions of technological scarcity, informal adaptation, and limited access to standardised tools and infrastructure. In many parts of the Global South (Bull and Banik, 2025), agricultural processing relies on locally assembled devices, modified machinery, and tools transferred from other sectors, developed informally and lacking formal development, certification, or ergonomic considerations. These structural conditions reflect broader inequalities in technological capabilities and industrial development (Bell and Pavitt, 1993). As a result, productivity remains constrained, occupational risks increase, and higher-value phases are frequently carried out outside the region, as activities such as packaging, transport logistics, and final commercialisation are often handled by actors external to the local context (Goyal, Hickel and Jha, 2025).

In the Vichada region, in south-eastern Colombia, the situation reflects these broader patterns. Cashew production has expanded significantly in recent years, supported by national and regional agricultural diversification programmes (Roman Hoyos and Arango Wiesner, 2007; Orduz-Rodríguez and Rodríguez-Polanco, 2022). Cashew has been promoted as a strategic crop for the Orino-





quía region for its tolerance of drought and adaptability to low-fertility soils (Arango Wiesner et alii, 2016; León, 2020). However, while cultivation has increased, technological development within the processing chain has not kept pace. The opening of the nut, separation of the shell, and handling of cashew nutshell liquid (CNSL) remain largely manual operations (Fig. 1).

Along the production chain, tools are often improvised or adapted from unrelated industries. Nut-opening devices are frequently repurposed cutting tools, heating systems rely on artisanal thermal processes, and storage containers are made from low-grade plastics that deteriorate rapidly in tropical conditions (Fig. 2). Although these adaptations demonstrate local ingenuity, they are typically developed without safety standards or ergonomic validation. This exposes workers to significant risks, including chemical burns from CNSL, repetitive strain injuries, and exposure to combustion residues (Fig. 3). Studies in other cashew-producing regions have documented skin damage and long-term occupational health issues among workers engaged in manual shelling (Andonaba et alii, 2017). The corrosive properties of CNSL are well established in the literature (Mazzetto, Lomonaco and Mele, 2009; Oliveira et alii, 2020), reinforcing the urgency of mitigating direct exposure. These technological limitations also affect productivity and product quality. Poorly calibrated opening mechanisms damage the edible seed of the cashew nut, lowering its commercial quality. Inefficient separation systems increase material loss. Uncontrolled heating can lead to seed fracture and uneven oil release.

Meanwhile, valuable by-products such as shells and ash are often underutilised despite their potential in composite materials and bio-based applications (Patel, Bandyopadhyay and Ganesh, 2006; Yuliana et alii, 2012; Prakash et alii, 2018; Harini et alii, 2018). This combination of safety risks, material waste, and low technological integration constitutes a critical bottleneck in the cashew value chain and calls for a supply chain perspective rather than isolated interventions (Gaddi and Mastrolonardo, 2024).

Recent studies frame these systems as complex socio-technical networks that require systemic design approaches (Barbero and Ferrulli, 2023; Maffei et alii, 2024). Within this debate, design is increasingly recognised as a driver of circular transitions through waste valorisation and locally grounded production systems (Santos Malaguti de Sousa et alii, 2023). Material innovation is understood not only in terms of technical performance but also in relation to perception and use (Del Curto et alii, 2022; Pedgley, Rognoli and Karana, 2016; Karana, Hekkert and Kandachar, 2009).

Despite growing attention to circular design[1], ergonomics in agro-processing, and technology appropriation (Vacanti and Leonardi, 2024), existing studies tend to address materials, processes, or tools separately. Limited research has examined how a recurrent tool within an agro-industrial system can serve as a systemic connector linking human factors, material valorisation, and distributed manufacturing.

This paper addresses this gap by formalising a design-led, interdisciplinary approach to the cashew production chain in Vichada, as applied in the Jurui[2] project. It proposes a replicable protocol for identifying and redesigning system-critical tools to improve safety, workflow continuity, and local manufacturability. The paper is structured as follows: Section 1 frames the context and state of the art; Section 2 identifies critical points; Section 3 presents the methodology; Sections 4-6 report on design development and validation; the final section discusses limitations, transferability, and implications. The contribution aligns with design for sustainability (Vezzoli, 2018; Manzini, 2015), which extends design beyond product development to encompass collaborative processes, scenario building, and supply chain resilience (Morpurgo, 2024; Gaddi and Mastrolonardo, 2024). Its originality lies in integrating waste valorisation, ergonomic redesign, distributed manufacturability, and local knowledge within a single intervention, reframing circular design as a relational and infrastructural condition embedded in production systems. Rather than replacing existing practices with imported industrial systems, the project sought to recognise and build upon local knowledge. Participatory approaches, such as social cartography and co-design workshops, enabled the integration of situated knowledge into technological development (Moore and Garzón, 2010; Sanders and Stappers, 2008). Material experimentation and engineering validation were conducted iteratively, ensuring that interventions remained technically feasible while remaining socially embedded.

Identifying critical points in the production chain | Field research in Vichada revealed that many of the tools and support systems used throughout the cashew production chain were adapted from unrelated industries. Beer containers, dairy baskets, plastic fruit boxes, and other generic containers were repurposed for collecting nuts, transporting them to processing machines, storing opened shells, or holding seedlings during early cultivation stages (Fig. 4). These improvised solutions reflected a strong capacity for local problem-solving and material reuse. However, they also exposed structural deficiencies in the technological environment surrounding cashew production.

While such adaptations demonstrate ingenuity and resilience, research on informal agro-industrial systems shows that improvised tools often heighten ergonomic risks and reduce process efficiency (Battini et alii, 2011; Dianat et alii, 2020; Rainbird and O'Neill, 1995). In Vichada, the absence of purpose-designed equipment led to unstable work surfaces, excessive lifting heights, irregular load distribution, and inconsistent container dimensions. These factors directly affected workers' posture and movement patterns.

Observational studies and participatory interviews documented frequent bending, twisting, and sustained static positions during harvesting,



Figg. 10, 11 | Conceptual diagram of the basket as a structural element linking material flow, labour movement, and storage logic; Local adaptations to existing plastic baskets, including ventilation modifications, base reinforcement, and handle adjustments (credits: Jurui Project, 2023).

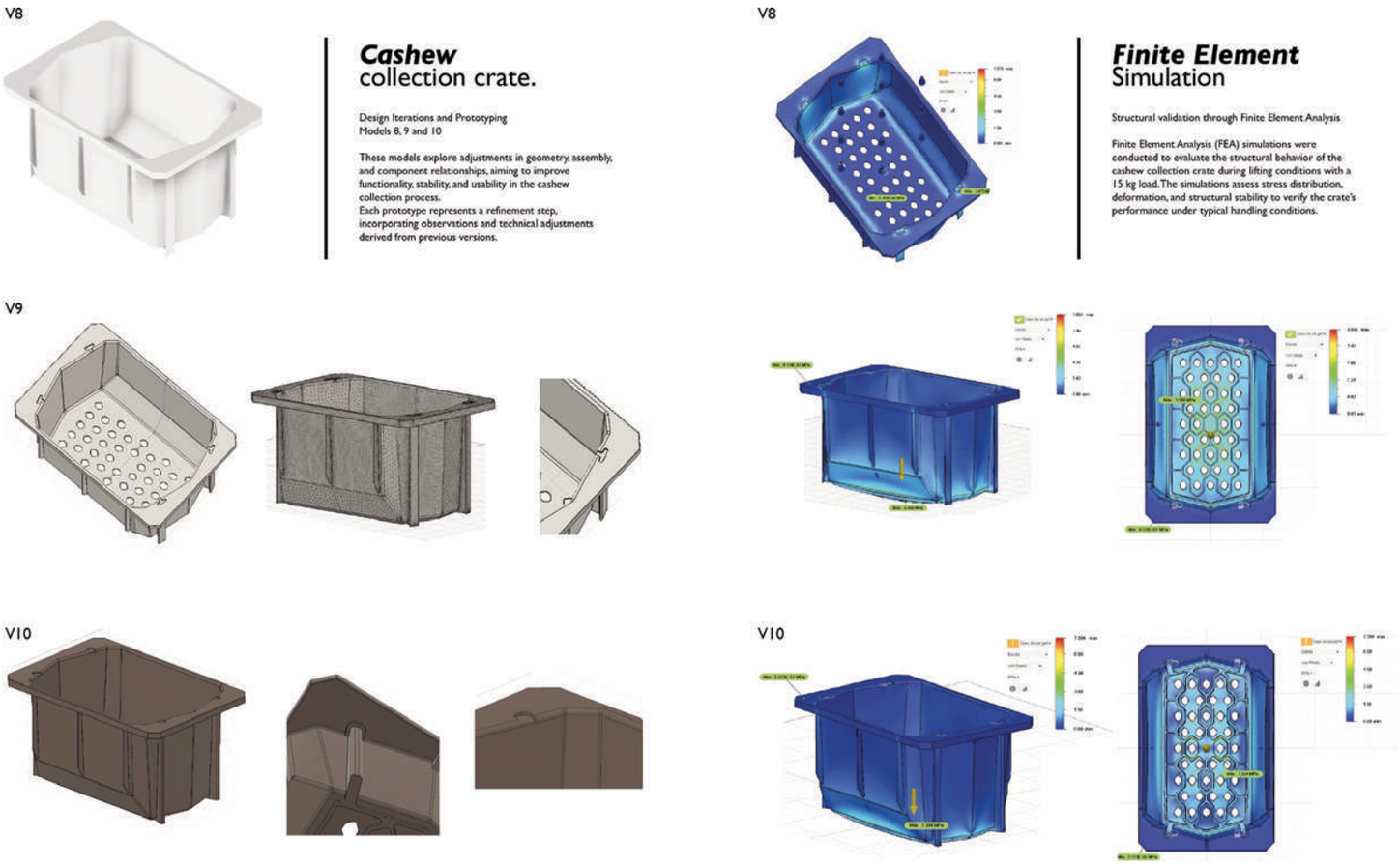


Fig. 12 | Design features integrated into the basket prototype, including ventilation slots, ergonomic handles, calibrated wall thickness, and stacking indentations (credit: Jurui Project, 2024).

roasting, nut opening, and shell separation tasks (Fig. 5). Workers reported chronic back pain, shoulder strain, and physical exhaustion after extended workdays. These symptoms align with findings from other small-scale agro-processing sectors, where repetitive manual labour and poorly designed tools contribute to musculoskeletal disorders (Fathallah, 2010; ILO, 2011). In particular, nut-processing tasks involve repetitive, forceful gripping, exposure to heat, and awkward wrist angles, all recognised ergonomic risk factors (Bao and Silverstein, 2005). In cashew processing, these physical demands are compounded by exposure to Cashew Nutshell Liquid (CNSL), increasing both mechanical and chemical risks.

The research team identified clear human-factor challenges across the production chain. These included: inappropriate working heights during shelling; manual handling of heavy containers of nuts or shells; unstable support structures used as platforms; repetitive fine-motor actions during kernel separation; and unsafe interactions with cutting or heating devices. In addition, container systems lacked modular coordination, complicating stacking, storage, and transport, particularly in fluvial transport contexts typical of the Orinoco basin. Rather than dismissing these adaptations as inadequate or informal, the project treated them as critical evidence of local technological agency (Brennan and Luloff, 2007). Improvised systems were analysed as prototypes already in use, representing solutions that had emerged organically under resource constraints. This perspective aligns with research in design for sustainability (Vezzoli, 2018) and appropriate technology (Vacanti and Leonardi, 2024), which argues that innovation in peripheral regions should begin by recognising and refining existing practices rather than replacing them entirely (Smith, Fressoli and Thomas, 2014).

Through co-creation workshops, participatory mapping, and direct observation, the team fostered synergies between actors across the agro-industrial system and the design and engineering teams (Massari et alii, 2025). These activities enabled the identification and analysis of improvised tools, including their functions, load capacities, ergonomic configurations, and material durability (Fig. 6). This mapping identified specific intervention points within the chain: harvesting support tools, shell transport containers, work surface elevation systems, and modular stacking units. Each critical point was analysed with respect to safety, efficiency, and integration with subsequent processing stages.

Methodology: research protocol and replicability | This study adopts a design-led, interdisciplinary protocol that combines field observation, co-creation, material experimentation, engineering validation, and in-situ testing. The research was structured into six phases: 1) mapping the cashew production chain and identifying ergonomic and operational bottlenecks; 2) documenting and classifying locally adapted tools through observation and workshops; 3) material experimentation with cashew shell residues; 4) interdisciplinary co-design integrating design, mechanical, and chemical engineering; 5) iterative prototyping and simulation-based validation; and 6) field testing under real production conditions.

Participants were selected based on their involvement in the production chain and on technical roles in the project[3]. Cases were defined by recurrence across production stages and by relevance to ergonomic risk and workflow inefficiency. Data comprised observations, user feedback, prototype performance, and simulation outputs. Testing focused on load capacity (~10 kg), ergonomics, pouring control, structural resistance, and machine compatibility. Comparison with existing containers was based on qualitative and applied performance evaluation (Tab. 1). The protocol is replicable through this sequence of phases and can be adapted to other agro-industrial contexts, although outcomes remain context-dependent.

The design and engineering teams conducted laboratory experiments using cashew shell residues (particles and ash) combined with biodegradable polymers such as PLA. The resulting composites showed improved rigidity and stability, supporting processing by injection and compression moulding (Fig. 7), consistent with findings on lignocellulosic fillers (Bogoeva-Gaceva et alii, 2007; Azwa et alii, 2013).

This shifted the research from material exploration to systemic application. Mapping the production chain revealed baskets as a recurring element across harvesting, transport, processing, drying, and cultivation (Fig. 8), positioning them as infrastructural connectors. However, existing con-



Fig. 13 | Compatibility testing of the redesigned basket with R&D prototypes for cashew nut opening, separation, and classification in Vichada (credit: Jurui Project, 2024).

tainers, often made of repurposed plastic, lacked ergonomic design, structural durability, and compatibility with production processes, contributing to inefficiencies, material loss, and worker strain (Neumann, Ekman, and Winkel, 2009).

The basket was therefore identified as a strategic intervention point. Rather than introducing new, isolated devices, the project applied the developed composite to redesign containment systems. Guided by material-driven design and DIY material principles (Karana et alii, 2015; Rognoli et alii, 2015), material properties informed the development of modular, stackable, and ergonomically adapted baskets. These function as infrastructural elements that improve load distribution, reduce exposure to CNSL, and integrate with nut-opening machinery developed within the project.

The research evolved through three interconnected streams: 1) composite material development from cashew residues; 2) design of a container system addressing ergonomics, safety, and workflow; and 3) development of nut-opening machinery that minimises contact with CNSL (Ayala-Garcia et alii, 2025). While interdependent, this paper focuses on the second stream, analysing the basket as a system-specific artefact within the production chain.

Integrative design process and co-creation | Design plays a central role in integrating material development, engineering constraints, and community knowledge. Rather than functioning solely as a component in the development of technical solutions, design serves as a mediating framework that enables dialogue across disciplines and between laboratory experimentation and territorial reality (Barbero and Ferrulli, 2023). Workshops were held with mechanical engineering, chemical engineering, and design teams to identify shared requirements, performance constraints, and opportunities for convergence (Fig. 9). These sessions aligned structural performance criteria, processing limitations, ergonomic considerations, and material availability within a coherent development strategy. The interdisciplinary exchange made each discipline's assumptions explicit. Mechanical engineers defined load-bearing requirements, stacking resistance, and manufacturability parameters. Chemical engineers contributed material compatibility thresholds, processing temperatures, compositional limits for cashew shell-based composites, and criteria for isolating the corrosive component of CNSL. Designers translated these technical constraints into spatial, ergonomic, and systemic considerations, ensuring that the resulting object would function within the rhythms of daily production practices, integrate with the machine-opening systems, and allow workers to operate in ergonomically safe conditions.

Through iterative discussions and rapid prototyping, the basket gradually emerged as a system-specific object. The team agreed that it could not be developed as a generic agro-industrial container, but rather as one explicitly designed for the cashew production chain in Vichada. Its development was based on direct observation of the harvesting, roasting, drying, and packaging stages in the region. The basket was understood not as an isolated artefact, but as an infrastructural element connecting material flow, labour movement, and storage logic (Fig. 10).

Local practices played a decisive role in shaping the design. Farmers and processors frequently modified existing plastic containers by cutting side panels to improve ventilation, reinforcing bases to



Fig. 14 | Controlled pouring tests using sacks and prototype receivers to evaluate rim geometry and wall inclination to reduce spillage (credit: Jurui Project, 2025).

prevent cracking, lining interiors to avoid kernel damage, or adjusting handles to improve grip. These informal adaptations revealed latent design intelligence embedded in everyday use (Fig. 11). Rather than eliminating these modifications, the project reinterpreted them as formal design features. Ventilation slots were dimensioned and positioned to meet drying requirements; handle geometry was adjusted to reduce wrist strain, keeping the hand as far as possible from opened nutshells and their liquid; wall thickness was calibrated to improve durability while minimising weight; stacking systems were redesigned to stabilise vertical loads during transport (Fig. 12).

Results: basket features and evolution | Through iterative prototyping and field testing, a clear set of functional and ergonomic requirements was progressively defined. The basket was designed to hold approximately 10 kg of cashew nuts, in line with manual handling thresholds that balance efficiency with reduced physical strain. This capacity was validated through direct testing with workers.

Compatibility with the nut-opening and separation machines developed in parallel was also essential (Fig. 13). The basket geometry was calibrated to match machine heights and collection systems, enabling a continuous workflow and reducing handling steps. Controlled pouring was another key requirement: rim geometry and wall inclination were optimised to ensure smooth discharge without spillage (Fig. 14). A symmetrical form ensured balanced weight distribution, improving stability and reducing compensatory movements and contact with CNSL.

The ergonomic handle design was refined in terms of curvature, thickness, and placement to reduce hand strain and wrist deviation during repetitive tasks. Structural robustness was also critical: the basket was designed to withstand impacts, stacking pressure, and repeated use. Ventilation openings were concentrated at the base to simplify fabrication, improve airflow during drying, and reduce material use while maintaining stability (Fig. 15). Compatibility with seedling 'tubetes'[4] extended the basket's function to cultivation stages, reinforcing its systemic role across the production chain (Fig. 16). Prototypes were developed at low and high resolution. Low-resolution models (cardboard, MDF, 3D-printed parts) were used to test proportions, stacking, and interaction logic. Workers interacted directly with these models, allowing observation of grip, posture, and handling patterns, supported by photographic and posture-mapping analyses (Fig. 17).

High-resolution prototypes were tested under real-world conditions, including repetitive lifting, stacking, and integration with machinery. Load capacity, impact resistance, and durability were evaluated through controlled tests simulating daily use (Fig. 18). Field validation was conducted with workers at all production stages. Observations focused on posture, grip comfort, load balance, and transfer efficiency. Comparative assessments with existing containers highlighted reduced spillage, improved stability, and better integration across processing, drying, and cultivation stages (Fig. 19).

Engineering integration and manufacturing strategy | An iterative integration process with the mechanical engineering team introduced structural simulations to optimise the basket geometry. Finite element analysis was used to evaluate stress distribution under load (10 kg), stacking pressure, and impact conditions, informing adjustments to

wall thickness, rib placement, and base reinforcement. A key constraint was maintaining manufacturability within a low-complexity technological framework (Fig. 20). Rather than relying solely on centralised industrial production, the project explored distributed manufacturing strategies compatible with regional capacities. Digital fabrication tools, modular mould systems, and open-source fabrication documentation were evaluated as means to reduce entry barriers and increase reproducibility.

Workshops and technical mapping revealed a broad range of skills across the region, including mechanical repair, welding, carpentry, and small-scale fabrication. Motorcycle repair workshops, agricultural tool maintenance shops, and informal fabrication spaces demonstrated technical competence that could be mobilised for mould production, equipment maintenance, and small-batch manufacturing. This shifted the design strategy towards distributed manufacturability, enabling locally grounded and territorially sustainable innovation (Vacanti and Leonardi, 2024).

Prototyping, validation, and circular implementation | Final basket prototypes were produced using additive manufacturing, specifically 3D printing, to validate geometric accuracy, structural performance, and integration with the previously developed nut-opening and separation machines. Testing was conducted in parallel with the machinery prototypes to assess workflow continuity, load transfer between stages, and compatibility with shell collection systems (Fig. 21). These validations enabled the team to assess measurable improvements in ergonomics, productivity, and operational safety. Observations confirmed fewer manual handling steps, improved posture during lifting and pouring, and reduced material loss from spillage. The integration of the basket with the mechanical system also enabled more efficient shell recovery, supporting downstream material reuse.

Beyond physical prototyping, the project incorporated a structured process of knowledge transfer and capacity building, which is essential if small infrastructures and micro-territorial networks in Vichada are to engage in green transitions (Gaddi and Mastrolonardo, 2024). Technological developments were presented to community members to assess interest, adoption feasibility, and local manufacturing potential. Feedback sessions enabled participants to evaluate perceived benefits and op-







erational challenges, ensuring that implementation strategies aligned with regional conditions.

A formal partnership was established with the regional vocational training centre, SENA (SErvicio Nacional de Aprendizaje), which committed to supporting technical training in machine operation, composite material processing, and digital fabrication. Training modules were designed to address both operational safety and manufacturing competence, enabling local actors to maintain and replicate the developed systems. Open production plans and technical documentation were prepared to facilitate decentralised manufacturing and reduce dependence on external suppliers.

To support the qualitative assessment of the proposed system, a comparative evaluation was conducted between the existing adapted containers and the redesigned basket system (Tab. 2). The comparison considered key operational parameters, including handling steps, product loss during pouring into the machinery, ergonomic strain, and workflow continuity. Although the study is not based on controlled measurements, field observations and repeated testing indicate reduced material loss, improved load-handling conditions, and more continuous integration between production stages. These results suggest that the intervention contributes to operational efficiency and to improved working conditions and reduced exposure to risks associated with manual handling and contact with cashew nut shell liquid (CNSL).

Limitations and transferability | This research has several limitations. The study is based on a single territorial case, and the findings are therefore conditioned by the specific socio-economic, environmental, and infrastructural conditions of the Vichada region. The evaluation of the proposed system is primarily based on qualitative and applied performance observations rather than long-term quantitative data. In addition, the durability of the developed material and the long-term adoption of the proposed tools require further validation under extended operational conditions.

Beyond these limitations, the dissemination of the approach faces several barriers. Cultural factors include the persistence of established practices and resistance to modifying familiar tools. Economic constraints relate to limited access to investment, equipment, and stable markets for locally produced solutions. Logistical and infrastruc-

Previous page

Fig. 15 | Ventilation openings concentrated at the base of the basket to improve airflow during drying and storage (credit: Jurui Project, 2025).

Fig. 16 | Use of the basket as a support container for seedling cultivation, verifying compatibility with agricultural 'tubete' height (credit: Jurui Project, 2025).

Fig. 17 | Low-resolution prototypes used to evaluate ergonomics, grip patterns, stacking logic, and spatial proportions (credit: Jurui Project, 2025).

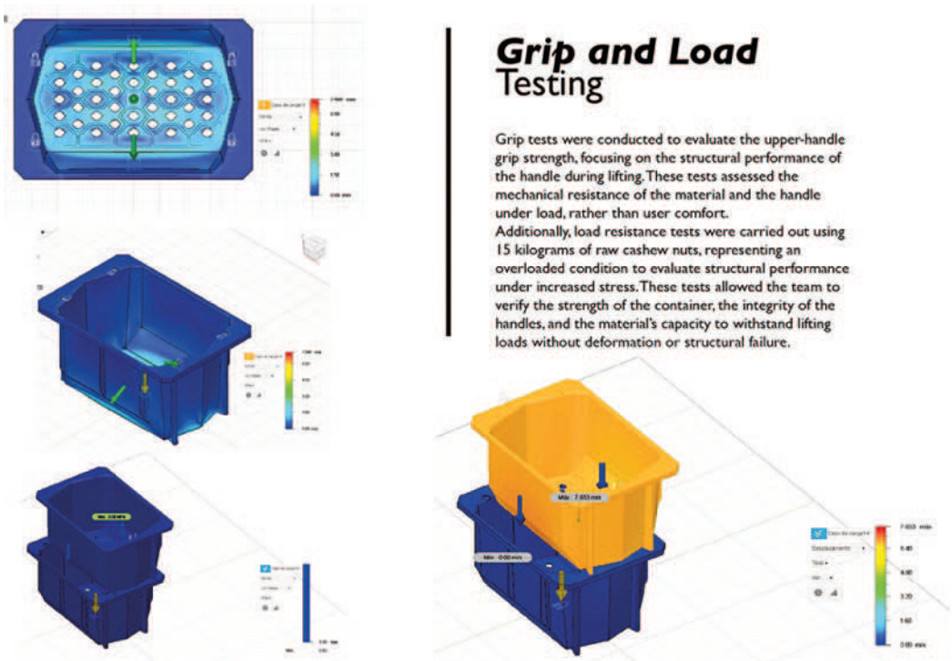


Fig. 18 | High-resolution prototype subjected to load and impact tests with approximately 10 kg of cashew nuts, complemented by finite element simulations for design validation (credit: Jurui Project, 2025).



Fig. 19 | Field validation assessing transfer efficiency, spillage during pouring, and stacking stability during transport (credit: Jurui Project, 2025).



Figg. 20, 21 | Final basket prototype validated with users and integrated with the nut-opening system and the shell separation and classification workflow (credits: Jurui Project, 2025).

tural barriers are linked to the region's geographical isolation, which affects access to materials, maintenance, and distribution networks, particularly in the absence of a clearly structured local alternative supply chain (Gaddi and Mastrolonardo, 2024). Regulatory and institutional factors may also influence implementation, particularly regarding safety standards, certification, and support for decentralised production systems. These barriers align with challenges identified in the literature on appropriate technology (Vacanti and Leonardi, 2024) and rural innovation systems.

The research's transferability lies primarily in its methodological approach rather than in the direct replication of the developed basket. The protocol, based on mapping production chains, identifying recurrent tools, integrating local knowledge, and combining design, engineering, and material development, can be adapted to other agro-industrial systems, particularly in peripheral contexts of the Global South. (Bull and Banik, 2025). Its implementation depends largely on the design team's ability to structure a collaborative project involving engineers, scientists, and governmental institutions; however, this research demonstrates that such collaboration is feasible. The specific configuration of tools, material valorisation strategies, and manufacturing processes must nevertheless be redefined to suit local cultural practices, technical capacities, and infrastructural conditions.

Contribution to SDGs: synergies and trade-offs | The Jurui project primarily contributes to Sustainable Development Goals (SDGs) 9 and 10 by developing context-specific, low-complexity technological solutions embedded in the cashew production chain. In relation to SDG 9, the research promotes decentralised innovation by introducing locally manufacturable tools and material systems that reduce dependence on centralised industrial infrastructure. In relation to SDG 10, the project helps reduce inequalities by enabling broader participation across the value chain. Through co-creation processes, capacity building, and collaboration with local institutions, the research fosters access to technical knowledge and production capabilities, enabling local actors to engage not only as users but also as producers and maintainers of the system.

The project also generates indirect synergies with other SDGs. It supports SDG 12 by valorising

Variable	Evaluation criterion	Before the intervention	After the intervention	Observed improvement	Field evidence
Number of handling steps	Number of transfers between containers and processing stages	10-11 manual operations (collection, depulping, transfer to sacks, transport to cooking, unloading, post-cooking collection, transport to processing, input transfer, output transfer, transfer to separation, by-product storage).	5-6 manual operations (collection, transport, integrated depulping, cooking or direct transfer, processing, separation).	45-55% reduction in handling steps, reducing points of operational friction.	Cashew nuts could be kept within a single container across multiple stages, reducing intermediate transfers.
Product loss and reprocessing during transfers	Frequency of spillage and need for material repositioning	Low. Despite multiple transfers, material loss was not significant in the current system.	Low. Loss levels remained stable, with no increase associated with the proposed basket.	Low loss levels were maintained without affecting process performance.	No increase in losses was observed during testing; performance remained stable during filling and unloading operations.
Ergonomic strain	Handled weight (kg), loading height (m) and lifting configuration	High. Loads of up to ~40 kg are handled from ground level to heights between 1.80 m and 2.20 m, sometimes using ladders. This involves above-shoulder lifting and high physical strain.	Medium-low. Standardised load (~15 kg) and reduced working height (1.40–1.50 m), eliminating extreme lifting.	Significant reduction in physical strain and improved accessibility, enabling broader participation, including women.	Critical lifting conditions were observed in the current system, whereas the proposed system enabled safer, more stable and more continuous handling.
Operation time	Time per transfer (s) and units per equivalent volume	Bulk-to-basket transfer: 20–35 s, requiring approximately 1.8 baskets per bulk load (~40 kg). Hopper loading: 15–25 s with elevated lifting.	Basket transfer: 11–15 s per operation, requiring approximately 2.6 baskets for an equivalent volume (~15 kg per unit).	Reduction in time per operation. Although the number of units increased, overall efficiency was maintained.	Faster transfers and improved workflow continuity were observed during testing.
Workflow continuity	Number of interruptions and manual readjustments	Low. Fragmented workflow due to container changes and mismatches between stages.	High. The basket's designed outlet angle enables direct transfer to machines or other systems.	Improved system flow and fewer interruptions.	More direct feeding into subsequent stages was achieved, with fewer manual readjustments.
Inter-stage compatibility	Degree of fit between container and production system	Low. Differences between containers require constant manual adaptation.	High. The basket acts as a common interface across stages.	Improved articulation of the production system.	Better integration with worktables, filling processes and transformation stages was observed.
Cleaning and maintenance	Ease of cleaning and residue accumulation	Cleaning: medium–low. Complex geometries and multiple perforations make cleaning more difficult. Drying: medium–high. The high density of perforations enhances ventilation and promotes efficient material drying.	Cleaning: high. Fewer perforations improve cleanability by preventing particle and residue retention, while ventilation is preserved through stacking. Drying: medium. Although drying time may increase, this does not have a significant impact under the territory's climatic conditions.	Improved sanitary and operational conditions.	Less residue accumulation and easier cleaning were observed.
Operational safety	Risk associated with lifting and working height	High. Lifting from ground level to heights above 1.80 m and up to 2.20 m, including ladder use while carrying loads.	Medium-low. Working height reduced to 1.40–1.50 m, eliminating elevated lifting.	Reduced physical risk and improved safety conditions.	Risky practices observed in the current system were no longer required in the proposed system.

Parameter	Evaluation criterion	Basket prototype (FEM results)	Conventional system (reference condition)	Observed advantage
Structural resistance under static load	Von Mises stress compared with yield strength.	Maximum stress: 3.20-4.63 MPa (below yield strength of 16.35 MPa); safety factor: 3.5-5.1.	No structural validation; unknown stress distribution under load.	Verified structural integrity under operational loads.
Stacking performance	Load distribution across stacked units.	Stable stacking of up to five units; maximum stress: 3.43 MPa; safety factor ≈ 2.2.	Uncontrolled stacking; potential deformation or instability.	Controlled load transfer and stable storage conditions.
Impact resistance (drop test)	Deformation under impact compared with failure threshold.	Maximum plastic deformation: 16.09% (<30% failure criterion); no critical damage.	No validated impact performance; risk of failure during handling.	Resilience to accidental drops and operational misuse.
Load capacity and distribution	Load application and stress concentration.	Uniform load distribution; stress concentrated in non-critical zones.	Irregular load distribution depending on container type.	Reduced risk of structural failure in functional areas.
Ergonomic load conditions	Weight and lifting configuration.	Designed for a 15 kg load; compatible with controlled lifting conditions.	Loads of up to 40 kg, with lifting above shoulder height.	Reduced physical strain and improved handling conditions.
Material performance	Mechanical properties and circular material strategy.	Composite material (HDPE + 30% CNSA + 7% CNSL); yield strength: 16.35 MPa.	Conventional plastic containers or sacks without material optimisation.	Integration of mechanical performance and circular material strategy.
Geometric optimisation	Stress distribution and manufacturability.	Reinforced structure, filleted edges (>2 mm) and inclined walls for stress control.	Non-optimised geometries with potential stress concentrations.	Improved structural efficiency and manufacturability.
Functional durability	Performance under repeated-use conditions.	Elastic behaviour maintained under load; no permanent deformation expected.	Potential degradation due to lack of structural design.	Increased durability and reusability across the production chain.

Tabb. 1, 2 | Comparative assessment of workflow performance in the cashew production chain before and after implementation of the proposed basket; Performance measurement (credits: the Authors, 2026).

agro-industrial waste, transformed from discarded matter into a new material resource through approaches aligned with Material-Driven Design and DIY Materials (Del Curto et alii, 2022; Rognoli et alii, 2015), while also reducing product losses along transfer and processing stages; it further contributes to SDG 8 by improving working conditions and reducing ergonomic risks. However, implementing such approaches also involves trade-offs. Reliance on local capacities requires sustained institutional support and may be constrained by market integration, certification, and regulatory compliance. These tensions highlight the need to balance accessibility, performance, and scalability when designing circular and inclusive agro-industrial systems.

Discussion and conclusions | This research demonstrates how design can serve as an integrative force within agro-industrial systems, particularly in peripheral contexts where informal practices, infrastructural limitations, and material scarcity shape production. Through field observation, material experimentation, engineering validation, and participatory processes, the study identified the basket as a recurrent and strategic intervention point within the cashew production chain. The redesigned system improved ergonomic conditions, reduced material loss, enhanced workflow continuity, and enabled better integration with processing machinery.

Beyond these operational outcomes, the research's main contribution lies in its methodological and theoretical positioning. Rather than addressing materials, tools, or processes in isolation, the study proposes a design-led approach in which a single artefact is reframed as an infrastructural element linking human factors, material flows, and production systems. In this sense, circularity is not treated as a material property alone, but as a systemic condition emerging from the alignment of technologies, practices, and local capacities.

The findings also underscore the importance of lowering technological barriers. By prioritising locally manufacturable solutions, open documentation, and collaboration with regional actors, the project supports a shift from dependence on centralised industrial systems towards distributed, context-sensitive production models. This approach contributes to ongoing debates about appropriate technology, circular design, and agro-industrial innovation in the Global South. At the same time, the research has limitations. The study is based on a specific territorial case, and the evaluation relies primarily on qualitative and applied performance observations rather than long-term quantitative data. The material's durability and the system's sustained adoption require further validation over time.

The research's transferability lies primarily in its methodological framework. The protocol maps production chains, identifies recurring tools, and integrates design, engineering, and local knowledge. It can be adapted to other agro-industrial systems. However, its application depends on local cultural practices, technical capacities, and infrastructural conditions, and therefore requires contextual reinterpretation rather than direct replication.

Future developments should focus on long-term performance assessment of materials and tools, refining decentralised manufacturing strategies, and evaluating socio-economic impacts, including income diversification, reduced occupational risks, and local capacity building. Overall, the research contributes to the scientific debate by demonstrating that systemic transformation in agro-industrial contexts can be achieved through targeted, context-sensitive design interventions.

Acknowledgements

This paper forms part of the research project 'Use of Agro-industrial By-products in the Production of Cashew in the Department of Vichada', funded by the General System of Royalties (SGR) through the Ministry of Science, Technology and Innovation of Colombia and approved by OCAD ACTeI. The project ran from 2022 to 2025 and involved interdisciplinary collaboration between the Design Department at Universidad de los Andes and the Departments of Mechanical Engineering and Chemical and Food Engineering at Universidad de los Andes (Colombia), in partnership with the Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, SENA and the regional institutions in Vichada. Additionally, this work was supported by the Open Access Publishing Fund of the Free University of Bozen-Bolzano.

The contribution is the result of a common reflection by the Authors. However, given their different areas of expertise and disciplinary backgrounds, the roles in this publication are acknowledged as follows. C. Ayala-Garcia: writing, original draft preparation, methodology development and design lead for materials, packaging development, and machinery; analysis and interpretation of results; writing – review and editing. C. Perez Rodriguez: field research, integration of qualitative data and visual documentation Basket development; C. Ligia Forero: field research, integration of qualitative data and visual documentation; T. Cruz Perea: material formulation and characterisation, finite element modelling, testing; J. S. Porras: material characterisation, basket manufacturing, testing and evaluation; A. Maranon: material characterisation lead, packaging development and viability data collection; writing, review and editing; C. Hernández Acevedo: machine development and construction lead; O. Álvarez Solano: CNSL transformation lead; A. Porras Holguín: study conception and project lead; writing, review and editing.

All the Authors have read and approved the published version of this manuscript. The Authors wish to thank the Ministry of Science, Technology and Innovation and the OCAD of ACTeI, which carried out the feasibility assessment, prioritisation and approval of this research, with resources from the General System of Royalties (SGR), under Call No. 6 of the Project 'Use of Agro-industrial by-products in the production of cashew in the department of Vichada' – BPIN 2020000100571. Likewise, thanks are given to the government and the department's community for their interest and participation in the activities carried out to date.

Special thanks are extended to the research assistants for their valuable contributions across different streams of this work: G. Ortiz Mora and J. S. León for their advances in CNSL transformation; J. Rodríguez for machine prototyping; and H. C. Pacheco, C. A. Pino, A. A. Sánchez, and P. F. Van Grieken for machine construction.

Additional information related to this study may be requested from the corresponding author upon reasonable request.

Notes

1) For more information, see the webpage: ellenmacarthurfoundation.org/topics/circular-design/overview [Accessed 08 April 2026].

2) In the Sikuani language, spoken by indigenous tribes of the Vichada region, 'jurui' means cashew.

3) Direct beneficiaries numbered 140. They were defined and reached in accordance with the project's technical document, which identifies producers, processors, and actors involved in the cashew production chain in the Vichada region, aged 20 to 59 years, with no gender restriction, and selected based on availability, contextual knowledge, and experience in cashew processing.

4) Tubetes are small nursery containers used for seed germination and early seedling development, allowing controlled root growth before field transplantation.

References

Andonaba, J.-B., Lompo, S., Ouédraogo, V., Ouédraogo, F., Ouédraogo, M., Konaté, I., Diallo, B. and Traore, A. (2017), "Skin damage and aesthetic disadvantage observed in women in the hand craft shelling chain of cashew nuts in a factory in Bobo-Dioulasso, Burkina Faso", in *Journal of Cosmetics, Dermatological Sciences and Applications*, vol. 7, issue 3, pp. 211-220. [Online] Available at: doi.org/10.4236/jcdsa.2017.73020 [Accessed 30 March 2026].

Arango Wiesner, L. V., Clímaco Hio, J., Guevara Agudelo, E. J. and Navas Arboleda, A. A. (2016), *Corpoica Mapiria Ao1, Corpoica Yopare Ao2, Corpoica Yucao Ao3 – Clones de marañón para la altillanura plana de la Orinoquía colombiana*, Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria, Villavicencio – Meta. [Online] Available at: hdl.handle.net/20.500.12324/11535 [Accessed 08 April 2026].

Ayala-Garcia, C., Forero Lesmes, C., De Francisco Vela, S., Marañón León, A., Hernández Acevedo, C., Porras Holguín, A. and Álvarez Solano, O. (2025), "Jurui, Marañón mas allá de su nuez y su cascara – Tejiendo relaciones con la materia las personas, el lugar y la cultura", in *Inmaterial | Diseño, Arte Y Sociedad*, vol. 10, issue 20, pp. 14-55. [Online] Available at: doi.org/10.46516/inmaterial.v10.323 [Accessed 30 March 2026].

Azwa, Z. N., Yousif, B. F., Manalo, A. C. and Karunasena, W. (2013), "A review on the degradability of polymeric composites based on natural fibres", in *Materials and Design*, vol. 47, pp. 424-442. [Online] Available at: doi org/10.1016/j.matdes.2012.11.025 [Accessed 30 March 2026].

Bao, S. and Silverstein, B. (2005), "Estimation of hand force in ergonomic job evaluations", in *Ergonomics*, vol. 48,

issue 3, pp. 288-301. [Online] Available at: doi.org/10.1080/0014013042000327724 [Accessed 30 March 2026].

Barbero, S. and Ferrulli, E. (2023), "Transizione ecologica digitale – Il Design Sistemico nei processi di innovazione aperta delle PMI | Ecological and digital transition – Systemic Design in SMEs open innovation processes", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 13, pp. 269-280. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/13232023 [Accessed 08 April 2026].

Battini, D., Faccio, M., Persona, A. and Sgarbossa, F. (2011), "New methodological framework to improve productivity and ergonomics in assembly system design", in *International Journal of Industrial Ergonomics*, vol. 41, issue 1, pp. 30-42. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.ergon.2010.12.001 [Accessed 30 March 2026].

Bell, M. and Pavitt, K. (1993), "Technological accumulation and industrial growth – Contrasts between developed and developing countries", in *Industrial and Corporate Change*, vol. 2, issue 2, pp. 157-210. [Online] Available at: doi.org/10.1093/icc/2.2.157 [Accessed 30 March 2026].

Bogoeva-Gaceva, G., Avella, M., Malinconico, M., Buzarovska, A., Grozdanov, A., Gentile, G. and Errico, M. E. (2007), "Natural fiber eco-composites", in *Polymer Composites*, vol. 28, issue 1, pp. 98-107. [Online] Available at: doi.org/10.1002/pc.20270 [Accessed 30 March 2026].

Brennan, M. A., and Luloff, A. E. (2007), "Exploring rural community agency differences in Ireland and Pennsylvania", *in Journal of Rural Studies*, vol. 23, issue 1, pp. 52-61. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.jrurstud.2006.04.003 [Accessed 30 March 2026].

Bull, B. and Banik, D. (2025), "The Rebirth of the Global South – Geopolitics, Imageries and Developmental Realities", in *Forum for Development Studies*, vol. 52, issue 2, pp. 195-214. [Online] Available at: doi.org/10.1080/08039410.2025.2490696 [Accessed 08 April 2026].

Del Curto, B., Sossini, L., Santi, R. and Papile, F. (2022), "Percezione e plastiche sostenibili – Un tool digitale per gestire estetica e sostenibilità | Perception and sustainable plastics – A digital tool to manage aesthetics and sustainability", in *Agathón | International Journal of Architecture Art and Design*, vol. 12, pp. 280-289. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/12252022 [Accessed 08 April 2026].

Dianat, I., Afshari, D., Sarmasti, N., Sharifi Sangdeh, M. and Azaddel, R. (2020), "Work posture, working conditions and musculoskeletal outcomes in agricultural workers", in *International Journal of Industrial Ergonomics*, vol. 77, article 102941, pp. 1-9. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.ergon.2020.102941 [Accessed 30 March 2026].

Fathallah, F. A. (2010), "Musculoskeletal disorders in labor-intensive agriculture", in *Applied Ergonomics*, vol. 41, issue 6, pp. 738-743. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.apergo.2010.03.003 [Accessed 30 March 2026].

Gaddi, R. and Mastrolonardo, L. (2024), "Micro-reti locali per la transizione verde della filiera della lana | Local micro-networks for green transition of the wool supply chain", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 15, pp. 344-353. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/15292024 [Accessed 08 April 2026].

Goyal, M., Hickel, J. and Jha, P. (2025), "Increasing inequality in agri-food value chains – Global trends from 1995-2020", in *Global Food Security*, vol. 46, article 100883, pp. 1-10. [Online] Available at: doi org/10.1016/j.gfs.2025.100883 [Accessed 17 March 2026].

Harini, K., Chandra Mohan, C., Ramya, K., Karthikeyan, S. and Sukumar, M. (2018), "Effect of Punica granatum peel extracts on antimicrobial properties in walnut shell cellulose reinforced bio-thermoplastic starch films from cashew nut shells", in *Carbohydrate Polymers*, vol. 184, pp. 231-242. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.carbpol.2017.12.072 [Accessed 08 April 2026].

ILO – International Labour Organization (2011), *Safety and health in agriculture*, International Labour Office, Geneva. [Online] Available at: ilo.org/resource/other/safety-and-health-agriculture [Accessed 30 March 2026].

Karana, E., Hekkert, P. and Kandachar, P. (2009), "Meanings of materials through sensorial properties and manufacturing processes", in *Materials & Design*, vol. 30, issue 7, pp. 2778-2784. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.matdes.2008.09.028 [Accessed 08 April 2026].

Karana, E., Barati, B., Rognoli, V. and Zeeuw van der Laan, A. (2015), "Material Driven Design (MDD) – A method to design for material experiences", in *International Journal of Design*, vol. 9, issue 2, pp. 35-54. [Online] Available at: ijdesign.org/index.php/IJDesign/article/view/1965 [Accessed 30 March 2026].

León, Á. (2020), *Plan departamental de extensión agropecuaria 2020-2023*, Secretaría de Agricultura y Desarrollo Económico. [Online] Available at: minagricultura.gov.co/ministerio/direcciones/PublishingImages/Paginas/PDEA/Vichada.pdf [Accessed 08 April 2026].

Maffei, S., Bolzan, P., Bianchini, M., Zeccara, F., Barbero, S., Campagnaro, C., Di Prima, N., Filippini, A., Puglielli, M., Rosato, L., Lotti, G. and Pontillo, G. (2024), "Svelare la complessità della transizione circolare per il settore del mobile imbottito | Unveiling the complexity of circular transition for the upholstered furniture sector", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 16, pp. 304-313. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/16252024 [Accessed 08 April 2026].

Manzini, E. (2015), *Design, When Everybody Designs – An introduction to design for social innovation*, MIT Press.

Massari, S., Galli, F., Colombo, L. and Goretti, G. (2025), "Divinfood, NUCs e agrobiodiversità – Food Design Agile e Living Labs per l'innovazione sostenibile | Divinfood, NUCs and agrobiodiversity – Agile Food Design and Living Labs for sustainable innovation", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 17, pp. 398-411. [Online] Available at: doi.org/10.69143/2464-93 09/17282025 [Accessed 08 April 2026].

Mazzetto, S. E., Lomonaco, D. and Mele, G. (2009), "Óleo da castanha de caju – Oportunidades e desafios no contexto do desenvolvimento e sustentabilidade industrial | Cashew nut oil – Opportunities and challenges in the context of sustainable industrial development", in *Química Nova*, vol. 32, issue 3, pp. 732-741. [Online] Available at: doi.org/10.159 0/S0100-40422009000300017 [Accessed 30 March 2026].

Moore, E. and Garzón, C. (2010), "Social cartography – The art of using maps to build community power", in *Race, Poverty & the Environment*, vol. 17, issue 2, pp. 66-67. [Online] Available at: friendsofrpe.org/files/Moore.Garzon.17-2.pdf [Accessed 30 March 2026].

Morpurgo, E. (2024), "Biomateriali e zone umide – Filiere per l'edilizia e il tessile dalla valorizzazione di ecosistemi locali | Biomaterials and wetlands – Supply chains for construction and textiles through the enhancement of local ecosystems", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 16, pp. 314-323. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/16262024 [Accessed 08 April 2026].

Neumann, W. P., Ekman, M. and Winkel, J. (2009), "Integrating ergonomics into production system development – The Volvo Powertrain case", in *Applied Ergonomics*, vol. 40, issue 3, pp. 527-537. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.apergo.2008.09.010 [Accessed 30 March 2026].

Oliveira, N. N., Mothé, C. G., Mothé, M. G. and de Oliveira, L. G. (2020), "Cashew nut and cashew apple – A scientific and technological monitoring worldwide review", in *Journal of Food Science and Technology*, vol. 57, pp. 12-21. [Online] Available at: doi.org/10.1007/s13197-019-04051-7 [Accessed 08 April 2026].

Orduz-Rodríguez, J. and Rodríguez-Polanco, E. (2022), "Cashew (Anacardium occidentale L.) a crop with productive potential – Technological development and perspectives in Colombia", in *Agronomía Mesoamericana*, vol. 33, issue 2, pp. 24-41. [Online] Available at: doi.org/10.15517/am.v33i2.47268 [Accessed 30 March 2026].

Patel, R. N., Bandyopadhyay, S., and Ganesh, A. (2006), "Economic appraisal of supercritical fluid extraction of refined cashew nut shell liquid", in *Journal of Chromatography A*, vol. 1124, issue 1-2, pp. 130-138. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.chroma.2006.06.015 [Accessed 30 March 2026].

Pedgley, O., Rognoli, V. and Karana, E. (2016), "Materials experience as a foundation for materials and design education", in *International Journal of Technology and Design Education*, vol. 26, pp. 613-630. [Online] Available at: doi.org/10.1007/s10798-015-9327-y [Accessed 08 April 2026].

Prakash, A., Vadivel, V., Banu, S. F., Nithyanand, P., Lalitha, C., and Brindha, P. (2018), "Evaluation of antioxidant and antimicrobial properties of solvent extracts of agro-food by-products (cashew nut shell, coconut shell and groundnut hull)", in *Agriculture and Natural Resources*, vol. 52, issue 5, pp. 451-459. [Online] Available at: li01.tci-thaijo.org/index.php/anres/article/view/231843 [Accessed 30 March 2026].

Rainbird, G. and O'Neill, D. (1995), "Occupational disorders affecting agricultural workers in tropical developing countries – Results of a literature review", in *Applied Ergonomics*, vol. 26, issue 3, pp. 187-193. [Online] Available at: doi.org/10.1016/0003-6870(95)00016-6 [Accessed 30 March 2026].

Romám Hoyos, C. A. and Arango Wiesner, L. V. (2007), *Marañon (Anacardium occidentale L.) tecnologías de producción e industrialización*, Produmedios, Bogotá. [Online] Available at: hdl.handle.net/20.500.12324/13263 [Accessed 08 April 2026].

Rognoli, V., Bianchini, M., Maffei, S. and Karana, E. (2015), "DIY materials", in *Materials & Design*, col. 86, pp. 692-702. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.matdes.2015.07.020 [Accessed 08 April 2026].

Sanders, E. B. N. and Stappers, P. J. (2008), "Co-creation and the new landscapes of design", in *CoDesign | International Journal of CoCreation in Design and the Arts*, vol. 4, issue 1, pp. 5-18. [Online] Available at: doi. org/10.1080/15710880701875068 [Accessed 30 March 2026].

Santos Malaguti de Sousa, C., Queiroz Ferreira Barata, T., Dutra Profírio de Souza, C. and de Melo, F. G. (2023), "Urban Forest Management – Design-Driven Technology Pathways for the Valorization of Pruning Waste | Urban forests management – Design-driven technological routes for wood waste valuing", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 13, pp. 291-300. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/13252023 [Accessed 08 April 2026].

Smith, A., Fressoli, M. and Thomas, H. (2014), "Grassroots innovation movements – Challenges and contributions", in *Journal of Cleaner Production*, vol. 63, pp. 114-124. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.12.025 [Accessed 30 March 2026].

Yuliana, M., Huynh, L.-H., Ho, Q.-P., Truong, C.-T. and Ju, Y.-H. (2012), "Defatted cashew nut shell starch as renewable polymeric material – Isolation and characterization", in *Carbohydrate Polymers*, vol. 87, issue 4, pp. 2576-2581. [Online] Available at: doi. org/10.1016/j.carbpol.2011.11.044 [Accessed 08 April 2026].

Vacanti, A. and Leonardi, C. (2024), "Tecnologia, energia e tempo – Percorsi sperimentali per il design di tecnologie appropriate | Technology, energy, and time – Experimental paths for the design of appropriate technology", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 15, pp. 316-323. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/15262024 [Accessed 08 April 2026].

Vezzoli, C. A. (2018), *Design for environmental sustainability – Life cycle design of products*, Springer, London. [Online] Available at: doi.org/10.1007/978-1-4471-7364-9 [Accessed 30 March 2026].

DESIGN
Research & Experimentation

AGATHÓN – International Journal of Architecture, Art and Design | n. 19 | 2026 | pp. 450-463
ISSN print: 2464-9309 – ISSN online: 2532-683X | doi.org/10.69143/2464-9309/19262026

Article Info

Received 08 March 2026
Revised 12 April 2026
Accepted 13 April 2026
Published 30 June 2026

PROGETTARE CON LO YAN-LIPAO PER L'INNOVAZIONE NELL'INDUSTRIA 5.0

DESIGNING WITH YAN-LIPAO FOR INNOVATION IN INDUSTRY 5.0

Rewat Suksikarn

Abstract

L'articolo indaga l'integrazione tra materiali di origine biologica locali, saperi artigianali tradizionali e design industriale nella prospettiva dell'Industria 5.0. Per superare la frammentazione tra sperimentazione materica, conoscenza artigianale e sviluppo del prodotto, la ricerca propone l'Hybrid Craft-Industry Innovation Framework e lo verifica attraverso un processo di Material-Driven Co-Creative Design applicato allo 'yan-lipao', materiale tradizionale della Thailandia meridionale. La metodologia impiegata combina caratterizzazione del materiale, workshop di co-progettazione, modellazione digitale e realizzazionde di quattro prototipi al fine di verificare la versatilità dello 'yan-lipao', la trasferibilità delle tecniche di intreccio a prodotti contemporanei e il valore della collaborazione tra sapere artigianale e strumenti progettuali. I risultati mostrano che conoscenze locali, sperimentazione materica e co-progettazione possono sostenere prodotti sostenibili, radicati nel contesto e coerenti con filiere inclusive. Il contributo offre una base replicabile per ricerche su materiali sostenibili, artigianato e innovazione industriale.

This article investigates the integration of local bio-based materials, traditional craft knowledge, and industrial design from the perspective of Industry 5.0. To address the fragmentation between material experimentation, craft knowledge, and product development, the research proposes the Hybrid Craft-Industry Innovation Framework and tests it through a Material-Driven Co-Creative Design process applied to 'yan-lipao', a traditional material from Southern Thailand. The methodology combines material characterisation, co-design workshops, digital modelling, and the development of four prototypes in order to assess the versatility of 'yan-lipao', the transferability of weaving techniques to contemporary products, and the value of collaboration between craft knowledge and design tools. The results show that local knowledge, material experimentation, and co-design can support sustainable products that are contextually rooted and aligned with inclusive supply chains. The contribution offers a replicable basis for further research on sustainable materials, craft, and industrial innovation.

Keywords

design orientato ai materiali, design industriale, industria 5.0, materiali a base biologica, integrazione artigianato-industria

material-driven design, industrial design, industry 5.0, bio-based materials, craft-industry integration



Rewat Suksikarn is an Associate Professor of Industrial Design at Walailak University (Thailand) and a Researcher at the Center of Geosocial and Cultural Research for Sustainable Development. With over twenty years of experience in industrial design and sustainable product development, his research focuses on material-driven design innovation and the integration of traditional craft knowledge into contemporary industrial design. E-mail: suksikarn@gmail.com

La transizione verso l'Industria 5.0 rappresenta un passaggio rilevante nel paradigma della produzione industriale contemporanea poiché supera una visione centrata esclusivamente sull'efficienza dell'automazione, orientandosi verso sistemi produttivi centrati sulla persona, sostenibili e resilienti. In questo scenario le discipline del Design assumono un ruolo strategico di mediazione tra l'innovazione tecnologica, la responsabilità ambientale e i valori socioculturali. Negli ultimi anni i materiali di origine biologica hanno acquisito una crescente centralità come alternative sostenibili ai materiali industriali convenzionali, in quanto contribuiscono alle strategie di economia circolare, riducono la dipendenza da risorse non rinnovabili e rafforzano le filiere di approvvigionamento locali; ma nonostante tali potenzialità il loro impiego nei processi di sviluppo del prodotto industriale resta ancora limitato.

In questo quadro le pratiche artigianali tradizionali costituiscono una fonte di conoscenza particolarmente significativa, sebbene spesso marginalizzata, in merito al comportamento dei materiali, alle tecniche di lavorazione e all'uso delle risorse ecologiche locali. Gli artigiani custodiscono infatti un sapere tacito sedimentato nel tempo, maturato attraverso generazioni di pratica, che tuttavia rimane per lo più confinato in ambiti produttivi di piccola scala e raramente entra in relazione con i processi del design industriale. Lo 'yan-lipao' (Lygodium flexuosum) è una felce rampicante tradizionalmente impiegata nella Thailandia meridionale per la realizzazione di manufatti intrecciati; il materiale è apprezzato per la sua flessibilità, la sua resistenza e le sue specifiche qualità estetiche (Fig. 1). Gli artigiani locali hanno elaborato nel tempo tecniche di intreccio sofisticate, capaci di restituire oggetti di notevole raffinatezza formale e costruttiva (Fig. 2), ciononostante l'impiego dello 'yan-lipao' continua a rimanere prevalentemente circoscritto ai mercati dell'artigianato tradizionale.

La letteratura recente ha già riconosciuto le potenzialità dell'integrazione tra artigianato, tecnologie digitali e pratiche contemporanee di design; resta però meno sviluppata una lettura capace di connettere, in modo operativo, conoscenza artigianale, sperimentazione materica e scalabilità industriale. In risposta a questa lacuna, la ricerca introduce l'Hybrid Craft-Industry Innovation Framework (HCIF) come cornice per tradurre il sapere locale sui materiali in processi progettuali e produttivi più ampi.

Per rendere operativa questa impostazione la ricerca sviluppa un processo di Material-Driven Co-Creative Design (MDCD), che integra la sperimentazione sui materiali, la collaborazione tra studenti di design industriale e artigiani, nonché l'impiego di strumenti digitali per la progettazione. Attraverso tale approccio, lo studio analizza in che modo i materiali tradizionali, e in particolare lo 'yan-lipao', possano essere reinterpretati e tradotti in prodotti contemporanei.

La ricerca persegue tre obiettivi principali: in primo luogo definire un quadro progettuale centrato sulla persona, capace di integrare materiali di origine biologica locali e conoscenze artigianali tradizionali nel contesto dell'Industria 5.0; in secondo luogo elaborare una metodologia di progettazione co-creativa che favorisca il dialogo e la collaborazione tra designer e artigiani; infine verificare la fattibilità di tale approccio attraverso lo sviluppo di prodotti sperimentali. L'articolo si articola secondo una progressione coerente con tali obiettivi: una prima sezione ricostruisce il quadro teorico e critico di riferimento, esaminando la letteratura sull'Industria 5.0, sui materiali di origine biologica e sull'integrazione tra artigianato e design; le sezioni successive introducono l'HCIF e il processo MDCD; seguono la descrizione dell'impianto metodologico e delle procedure sperimentali, quindi la presentazione e la discussione degli esiti emersi dallo sviluppo dei prototipi. In chiusura il contributo propone una riflessione sui limiti della ricerca e sulle possibili implicazioni per il design sostenibile e per le future traiettorie dell'innovazione industriale.

L'HCIF proposto affronta questa frammentazione integrando materiali di origine biologica, conoscenze artigianali e co-progettazione in una struttura metodologica unitaria, orientata alla trasferibilità del sapere locale nei processi contemporanei di sviluppo del prodotto. Il contributo si colloca quindi nell'avanzamento del design guidato dai materiali e dell'innovazione fondata sull'artigianato, offrendo indicazioni utili alla ricerca sul design sostenibile, sul design circolare e sulle traiettorie dell'Industria 5.0.

Stato dell'arte e background teorico | La ricerca più recente sul design sostenibile e sull'Industria 5.0 ha progressivamente chiarito come i sistemi industriali siano sempre più chiamati a integrare innovazione tecnologica, creatività umana e responsabilità ambientale. Diversamente dai paradigmi industriali precedenti, prevalentemente orientati all'efficienza produttiva e all'automazione, l'Industria 5.0 promuove un modello di produzione centrato sulla persona e fondato sulla collaborazione tra tecnologie avanzate e conoscenza umana (European Commission, 2021; Ivanov, 2023; Huang et alii, 2022; Zizic et alii, 2022; Turner and Oyekan, 2023; Ghobakhloo et alii, 2022, 2024; Osello et alii, 2024; Yitmen et alii, 2023). In tale prospettiva i designer assumono un ruolo di particolare rilievo, poiché agiscono come mediatori tra conoscenza culturale, innovazione materica e processi di produzione industriale (Valenti, Trimarchi and Farresin, 2023; Zannoni et alii, 2024).

In questo quadro i materiali di origine biologica hanno suscitato crescente attenzione in quanto rappresentano un'alternativa sostenibile ai materiali industriali convenzionali. Il loro interesse risiede nella capacità di contribuire alle strategie di economia circolare, di ridurre la dipendenza da risorse non rinnovabili e di favorire filiere di approvvigionamento più localizzate (EMF, 2013; Geissdoerfer et alii, 2017; Bocken et alii, 2016; Kirchherr, Reike and Hekkert, 2017; Olivastri and Tagliasco, 2024; Pietroni et alii, 2023). Alcuni studi sottolineano inoltre come tali materiali possano sostenere lo sviluppo di prodotti a basso impatto ambientale e orientare pratiche progettuali più responsabili sotto il profilo ecologico (Maffei et alii, 2024; Pradhan et alii, 2024; Morpurgo, 2024). Parallelamente una parte rilevante della letteratura sui materiali sostenibili insiste sulla necessità di valutare gli impatti ambientali lungo l'intero ciclo di vita dei materiali, così da restituirne una comprensione più rigorosa e sistemica (Ashby, 2012; McDonough and Braungart, 2002).

La letteratura scientifica evidenzia altresì che l'artigianato tradizionale costituisce una fonte rilevante di conoscenze tacite relative ai materiali, ai processi produttivi e al patrimonio culturale. Le pratiche artigianali incorporano infatti una profonda comprensione del comportamento della materia, che solo raramente viene adeguatamente formalizzata o valorizzata nella ricerca industriale (Sennett, 2008; Luckman, 2015). Tali sistemi di conoscenza assumono pertanto rilievo non soltanto sul piano della conservazione culturale, ma anche nella definizione di modelli alternativi di innovazione, radicati nei contesti locali e nelle specificità territoriali (Manzini, 2015).

Nell'ambito della ricerca sul design gli approcci progettuali orientati ai materiali hanno progressivamente riconosciuto un ruolo sempre più centrale all'esperienza e alla sperimentazione materica nella definizione dell'innovazione di prodotto (Karana, Pedgley and Rognoli, 2014; Karana et alii, 2015; Pedgley, 2014; Giaccardi and Karana, 2015). In questa linea di ricerca il materiale non è considerato soltanto come supporto tecnico o componente costruttivo, ma come fattore attivo nella generazione di qualità d'uso, valori percettivi e significati di progetto. Altri studi, dedicati alle dimensioni espressive ed esperienziali dei materiali, mostrano infatti come i designer possano generare nuove forme di senso del prodotto attraverso l'esplorazione delle proprietà materiche e delle caratteristiche sensoriali (Rognoli, 2010; Rognoli et alii, 2015; Crippa, Rognoli and Levi, 2012).

Parallelamente le metodologie partecipative e di co-progettazione si sono affermate come approcci centrali nella ricerca contemporanea sul design, ponendo al centro la collaborazione tra designer, utenti e stakeholder quale condizione per la generazione di innovazione socialmente rilevante (Sanders and Stappers, 2008; Spinuzzi, 2005; Steen, 2013; Porfirione, Ferrari Tumay and Leggiero, 2024). La ricerca sul design partecipativo ha ulteriormente messo in luce il valore della sperimentazione collaborativa e dei processi progettuali di natura democratica nell'affrontare problemi sociali complessi, confermando come la qualità del progetto dipenda anche dalla capacità di attivare forme strutturate di coinvolgimento e scambio tra soggetti diversi (Binder et alii, 2015; Björgvinsson, Ehn and Hillgren, 2012).

Alla luce di tali sviluppi il rapporto tra artigianato tradizionale, design contemporaneo e produzione industriale è emerso come uno dei temi più rilevanti della ricerca recente; tale rapporto può essere interpretato come un campo di interazione tra conoscenza culturale, sperimentazione dei materiali e innovazione industriale (Fig. 3). La letteratura mostra come i designer possano reinterpretare le tecniche artigianali tradizionali attraverso l'impiego delle tecnologie digitali, aprendo la possibilità a nuove forme di sviluppo del prodotto che da un lato rispettano il patrimonio culturale, dall'altro sostengono processi di innovazione (Dal Falco and Al Azhari, 2024).

Altri contributi evidenziano il ruolo delle reti produttive locali e delle comunità artigianali nelle transizioni industriali orientate alla sostenibilità: le filiere localizzate dei materiali e i sistemi produttivi fondati sull'artigianato possono infatti rafforzare le economie regionali, riducendo al contempo gli impatti ambientali associati ai modelli di produzione globalizzati (Gaddi and Mastrolonardo, 2024). Tali orientamenti risultano coerenti con obiettivi di sostenibilità più ampi, riconducibili all'economia circolare, alla resilienza dei sistemi produttivi e a forme di innovazione più inclusive sul piano sociale (UNEP, 2023; ONU, 2024).

Nonostante tali avanzamenti, il rapporto tra conoscenze artigianali, materiali di origine biologica



Fig. 1 | 'Yan-lipao' ('Lygodium flexuosum') is a natural material traditionally used in Southern Thailand for woven craft production (credit: the Author, 2020).

e sviluppo di prodotti industriali resta spesso trattato in modo frammentario. Le esperienze esistenti mostrano il potenziale dell'integrazione tra saperi artigianali, biomateriali e tecnologie digitali, ma raramente affrontano in modo strutturato la questione della scalabilità e dell'applicazione industriale. Il contributo specifico dello studio consiste quindi nel proporre un dispositivo metodologico che renda osservabile e verificabile il passaggio dal sapere artigianale alla sperimentazione progettuale e allo sviluppo del prodotto (Verganti, 2009; Lloyd, 2017).

Hybrid Craft-Industry Innovation Framework | Assunto questo quadro teorico, la questione non risiede più nel semplice riconoscimento del valore dei materiali e dei saperi locali, bensì nella definizione di una cornice capace di renderli effettivamente operativi all'interno dei processi di innovazione di prodotto (European Commission, 2021; Ivanov, 2023). Nonostante il potenziale ormai ampiamente riconosciuto dei materiali artigianali e delle conoscenze locali la loro integrazione nello sviluppo del prodotto industriale continua infatti a presentarsi come limitata.

La produzione artigianale è generalmente connotata da ridotte scale produttive, da forme di sapere tacito e da pratiche profondamente radicate nei contesti locali; la produzione industriale si fonda al contrario su standardizzazione, scalabilità e ottimizzazione tecnologica. Mettere in relazione questi due sistemi richiede pertanto un diverso impianto concettuale, capace di connettere conoscenze culturali, prestazioni dei materiali e innovazione industriale all'interno di una medesima struttura interpretativa e operativa.

È in risposta a questa esigenza che la presente ricerca propone l'Hybrid Craft-Industry Innovation Framework (HCIF), concepito per sostenere la trasformazione dei materiali autoctoni di origine biologica e delle conoscenze artigianali tradizionali in risorse attivabili nel design industriale. Più che sostituire le pratiche artigianali con tecnologie industriali il framework mira a costruire un modello ibrido, in cui conoscenze artigianali, strumenti digitali di progettazione e strategie di produzione industriale interagiscono per generare nuove forme di innovazione materica. L'HCIF si articola in quattro dimensioni tra loro interconnesse – intelligenza dei materiali, conservazione delle pratiche artigianali, scalabilità industriale e capacità di risposta al mercato (Fig. 4) – che individuano i fattori ritenuti decisivi per favorire un'integrazione efficace dei materiali artigianali nei processi di sviluppo industriale del prodotto.

La prima dimensione, l'intelligenza dei materiali, riguarda la comprensione delle proprietà fisiche, meccaniche ed estetiche dei materiali autoctoni. Gli artigiani dispongono spesso di una conoscenza esperienziale particolarmente approfondita del comportamento della materia, che include aspetti quali la flessibilità, la durabilità e i vincoli di lavorazione. L'integrazione di questo sapere tacito con una sperimentazione sistematica sui materiali consente ai designer di esplorare nuove possibilità di innovazione progettuale guidata dalle qualità intrinseche della materia. In questa prospettiva il materiale non viene considerato come elemento passivo da applicare a un'idea predefinita, ma come componente attivo del processo progettuale, in grado di orientarne gli esiti formali, prestazionali ed espressivi.

Una seconda dimensione fondamentale è la conservazione delle pratiche artigianali che, incorporando identità culturali, saperi storici e tradizioni produttive regionali, costituiscono un Patrimonio culturale di particolare valore. L'inclusione di tali componenti nel design contemporaneo non assume soltanto una funzione conservativa, ma consente anche di attribuire ai prodotti un valore narrativo ed estetico specifico, radicato nei contesti culturali di provenienza. In tal senso recenti contributi mostrano come la reinterpretazione delle tradizioni artigianali attraverso il progetto possa generare esiti innovativi senza compromettere l'autenticità culturale delle pratiche da cui traggono origine (Dal Falco and Al Azhari, 2024).

La terza dimensione riguarda la scalabilità industriale, vale a dire la possibilità di tradurre tecniche artigianali in forme compatibili con i sistemi di produzione industriale. Se i processi artigianali tradizionali sono spesso caratterizzati da un'elevata intensità di lavoro manuale e da una forte dipendenza dal contesto, le metodologie di progettazione e gli strumenti digitali possono contribuire ad adattare tali tecniche a processi produttivi ripetibili, controllabili e potenzialmente scalabili. In questa direzione gli studi sulla transizione industriale sostenibile sottolineano l'importanza di integrare reti produttive locali e strategie progettuali innovative per costruire sistemi produttivi più resilienti, capaci di coniugare radicamento territoriale, flessibilità e innovazione (Gaddi and Mastrolonardo, 2024).

L'ultima dimensione è la capacità di risposta al mercato e riguarda l'attitudine dei prodotti sviluppati attraverso l'interazione tra artigianato e industria a confrontarsi con le domande del mercato contemporaneo. Un'innovazione di prodotto efficace non dipende infatti soltanto dalla fattibilità tecnica, ma richiede anche qualità estetica, prestazioni funzionali e sostenibilità economica. In questo passaggio il ruolo dei designer risulta decisivo, poiché traducono la conoscenza artigianale e la sperimentazione materica in soluzioni di prodotto in grado di rispondere alle esigenze, alle aspettative e ai criteri di valore propri dei contesti di consumo.

L'integrazione di queste quattro dimensioni consente all'HCIF di configurarsi come una struttura concettuale in grado di sostenere la collaborazione tra designer, artigiani e stakeholder industriali. Il framework promuove infatti lo sviluppo di strategie progettuali ibride, nelle quali la conoscenza della tradizione, i materiali sostenibili e l'innovazione industriale non sono considerati ambiti separati, ma componenti interagenti di un medesimo processo di sviluppo del prodotto. In questa prospettiva, l'HCIF non esaurisce il discorso teorico, ma definisce i criteri per interpretare le fasi operative dell'MDCD e per valutarne gli esiti. Più precisamente esso funge da dispositivo di lettura e di verifica, rendendo osservabile il modo in cui la relazione tra sapere artigianale, intelligenza dei materiali, trasferibilità produttiva e orientamento al mercato possa tradursi in una pratica progettuale strutturata.

Processo basato sul Material-Driven Co-Creative Design | Il processo di Material-Driven Co-Creative Design (MDCD) costituisce la traduzione operativa dell'HCIF e organizza l'interazione tra designer, artigiani e sperimentazione materica. In questa prospettiva il materiale non è selezionato dopo la definizione del concept, ma agisce come punto di avvio dell'innovazione progettuale, orientando forma, prestazioni e qualità d'uso del prodotto (Correa et alii, 2023).In tale quadro il processo MDCD integra sperimentazione sui materiali, attività di progettazione collaborativa e strumenti digitali di progettazione con l'obiettivo di tradurre il sapere artigianale in applicazioni del design industriale. La valutazione delle prestazioni dei materiali è inoltre supportata da metodologie consolidate di valuta-

zione del ciclo di vita (LCA) e da quadri procedurali fondati su standard ISO (2006a, 2006b) che offrono una base strutturata per l'analisi degli impatti ambientali lungo l'intero ciclo di vita dei materiali (Bruijn et alii, 2002); in parallelo gli approcci di valutazione integrata vengono impiegati sempre più spesso per esaminare impatti e benefici ambientali complessi all'interno dei sistemi materici (Sposito e De Giovanni, 2023).

Il processo MDCD si articola in sei fasi iterative concepite per consentire a designer e artigiani di sviluppare progressivamente nuovi concetti di prodotto, mantenendo l'attenzione sia al comportamento dei materiali sia ai saperi culturali incorporati nelle pratiche di lavorazione (Fig. 5).

La prima fase è dedicata all'esplorazione e alla documentazione del materiale: in questa fase i designer indagano le caratteristiche fisiche del materiale locale, la sua flessibilità e il suo comportamento strutturale. Nel caso dello 'yan-lipao', la fase ha incluso l'osservazione diretta delle pratiche tradizionali di intreccio e l'analisi delle modalità con cui gli artigiani selezionano e preparano il materiale prima della lavorazione. Anche le operazioni di preparazione e condizionamento vengono accuratamente documentate al fine di comprendere i parametri che incidono sulle prestazioni del materiale e sulle sue possibilità applicative (Fig. 6).

La seconda fase riguarda la caratterizzazione e la sperimentazione del materiale: in questa fase i campioni selezionati sono sottoposti a prove meccaniche e strutturali finalizzate a valutare proprietà quali la flessibilità, la resistenza a trazione e la durabilità. I test producono informazioni di natura quantitativa che integrano e rendono confrontabili le conoscenze empiriche maturate dagli artigiani nel corso della pratica; le procedure di prova meccanica vengono condotte mediante configurazioni sperimentali standardizzate, progettate per analizzare in modo controllato il comportamento strutturale del materiale e per fornire dati utili alla successiva elaborazione progettuale (Fig. 7).

La terza fase prevede lo svolgimento di workshop di progettazione co-creativa tra studenti di design industriale e artigiani: i workshop operano come piattaforme di scambio tra forme differenti di conoscenza: da un lato gli artigiani condividono tecniche di intreccio, modalità di lavorazione e competenze maturate nella relazione diretta con il materiale, dall'altro gli studenti introducono metodi progettuali contemporanei, pratiche di sviluppo del concept e strumenti di modellazione digitale. L'ambiente collaborativo così costruito favorisce la sperimentazione di nuove geometrie, nuove configurazioni strutturali e nuove tipologie di prodotto, rendendo il confronto tra il sapere tradizionale e gli strumenti contemporanei un dispositivo generativo del processo di progetto.

Nel corso della quarta fase entrano in gioco gli strumenti digitali di progettazione, impiegati per tradurre le evidenze e le intuizioni emerse nei workshop in concetti di prodotto sempre più definiti: la modellazione parametrica e la visualizzazione digitale consentono di esplorare configurazioni strutturali derivate da configurazioni di intreccio tradizionali, permettendo ai designer di verificare la coerenza tra forma, comportamento del materiale e potenziale realizzativo. La modellazione digitale consente inoltre di valutare proporzioni, assetti geometrici e possibili vincoli di produzione prima del passaggio alla prototipazione fisica, svolgendo quindi una funzione di mediazione tra la sperimentazione artigianale e la verifica progettuale.

La quinta fase è dedicata allo sviluppo e alla realizzazione dei prototipi: a partire dalle elaborazioni maturate nelle fasi precedenti viene prodotta una serie di prototipi sperimentali attraverso il lavoro congiunto di studenti di design e artigiani. Questa fase assume un ruolo cruciale, poiché consente al gruppo di ricerca di verificare in che modo le tecniche artigianali tradizionali possano essere adattate a prodotti contemporanei, senza compromettere né l'integrità strutturale né l'autenticità materica. La realizzazione prototipale rende dunque osservabile il passaggio dalla conoscenza del materiale alla sua traduzione in esiti progettuali dotati di coerenza formale, costruttiva e applicativa.

La fase conclusiva riguarda la valutazione e il perfezionamento del progetto: i prototipi vengono analizzati in relazione alle prestazioni strutturali, alle qualità estetiche e al loro possibile impatto sul mercato. Le osservazioni e i riscontri formulati da designer, artigiani e potenziali utenti vengono quindi reinseriti nelle iterazioni successive del processo progettuale, per orientare il miglioramento progressivo degli esiti. Attraverso questo dispositivo valutativo di natura iterativa la metodologia MDCD consente il perfezionamento graduale dei prodotti e contribuisce a garantire che i risultati finali rimangano coerenti con gli obiettivi di un design sostenibile, culturalmente consapevole e metodologicamente fondato.

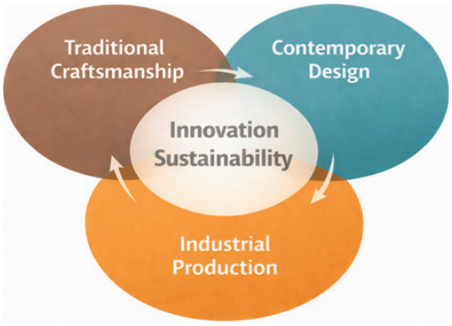
Più che ribadire in forma astratta il modello proposto, le sezioni successive ne mettono alla prova la tenuta attraverso tre passaggi strettamente concatenati: la caratterizzazione del materiale, la coprogettazione e lo sviluppo prototipale; è infatti nella relazione tra questi tre momenti che il framework metodologico trova la propria verifica operativa, mostrando in che modo la convergenza tra intelligenza dei materiali, saperi artigianali e pratiche progettuali possa tradursi in un processo di innovazione concretamente osservabile e valutabile.

Caratterizzazione dei materiali | La fase di caratterizzazione dei materiali è finalizzata a indagare in modo sistematico le proprietà fisiche e meccaniche dello 'yan-lipao' per sostenerne l'impiego nei processi di design industriale. Sebbene tale materiale sia tradizionalmente impiegato nell'ambito della produzione artigianale il suo comportamento strutturale è stato raramente analizzato mediante procedure sperimentali. Per questa ragione la presente ricerca mette in relazione la conoscenza empirica degli artigiani con test controllati sul materiale e con un apparato documentale capace di restituirne, in modo più rigoroso, le prestazioni e le potenzialità applicative.

La caratterizzazione prende avvio dalla preparazione e dalla stabilizzazione igrometrica dei campioni: gli steli dello 'yan-lipao' vengono raccolti, puliti, essiccati e trasformati in fibre idonee alla sperimentazione. Il contributo degli artigiani è decisivo nell'individuazione delle modalità più appropriate di taglio, apertura e trattamento preliminare, mentre



Fig. 2 | Traditional 'yan-lipao' weaving techniques performed by craft practitioners in Southern Thailand (credit: the Author, 2020).



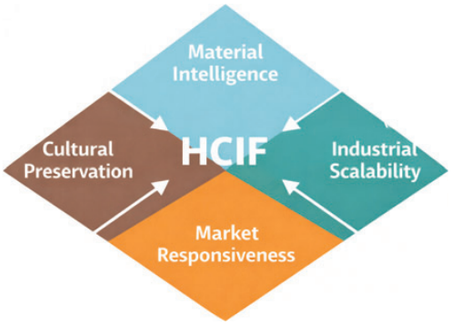


Fig. 3 | Conceptual relationship between traditional craftsmanship, contemporary design practices and industrial production systems (credit: the Author, 2026).

Fig. 4 | Hybrid Craft-Industry Innovation Framework (HCIF) integrating material intelligence, cultural preservation, industrial scalability, and market responsiveness (credit: the Author, 2026).

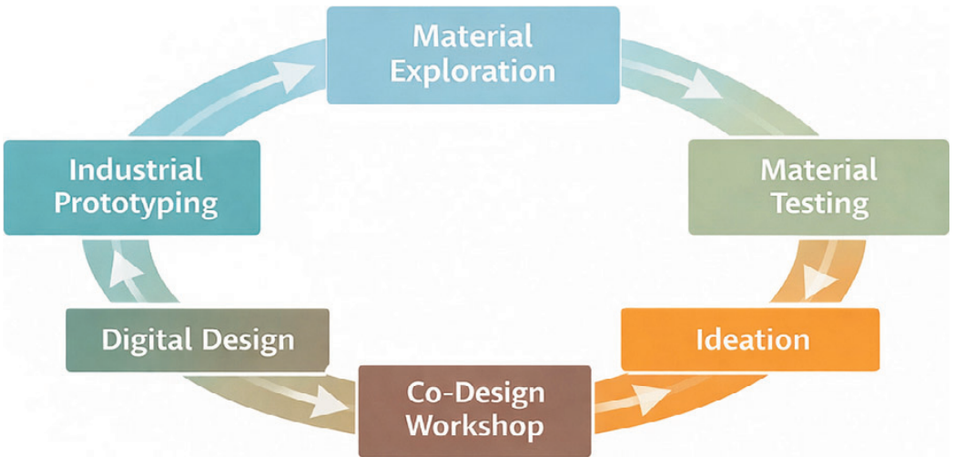


Fig. 5 | Material-Driven Co-Creative Design (MDCD) process illustrating the six phases of the research methodology (credit: the Author, 2026).

le procedure di controllo consentono di ottenere campioni omogenei per dimensione e umidità.

Le prove meccaniche misurano il comportamento deformativo del materiale e la sua resistenza ai carichi applicati, integrando la conoscenza empirica degli artigiani con dati quantitativi. Lo studio considera inoltre le operazioni di piegatura, tessitura e intreccio strutturale, poiché le prestazioni dei manufatti dipendono tanto dalle proprietà delle singole fibre quanto dalla loro interazione nelle diverse configurazioni di intreccio.

L'analisi conferma alcune qualità distintive dello 'yan-lipao' – flessibilità, leggerezza e capacità di generare strutture curve complesse – che ne suggeriscono l'impiego in applicazioni attente alla resilienza strutturale e alla qualità estetica (Fig. 8). Questi dati costituiscono la base tecnica per la successiva esplorazione progettuale.

Laboratori di progettazione co-creativa | I laboratori di progettazione co-creativa costituiscono una fase centrale della ricerca, poiché consentono l'interazione diretta tra studenti di design industriale e artigiani. I workshop, a cui hanno preso parte complessivamente 10 studenti di design industriale e 5 artigiani, operano come contesti sperimentali nei quali convergono saperi artigianali tradizionali, esplorazione materica e metodi del progetto contemporaneo, con l'obiettivo di favorire lo scambio di conoscenze e la sperimentazione collaborativa finalizzati alla traduzione dei materiali autoctoni in nuovi concetti di prodotto.

I partecipanti sono stati selezionati in base alla loro esperienza, rispettivamente, nella produzione artigianale e nella pratica del design. Il protocollo dei laboratori si articolava in più fasi: preparazione dei materiali, sperimentazione delle tecniche di intreccio, esplorazione morfologica e sviluppo del prototipo. I dati sono stati raccolti attraverso l'osservazione diretta, la documentazione fotografica e la registrazione delle diverse iterazioni progettuali, mentre la valutazione dei prototipi è stata condotta secondo criteri predefiniti che comprendono le prestazioni strutturali, l'usabilità, la qualità estetica e il potenziale di mercato.

Nel corso dei workshop gli artigiani hanno introdotto i partecipanti alle tecniche tradizionali di intreccio dello 'yan-lipao' e mostrato come il materiale viene preparato, manipolato e organizzato strutturalmente nel processo produttivo artigianale. Questo sapere tacito, maturato attraverso una lunga esperienza pratica, fornisce indicazioni essenziali sulla flessibilità del materiale, sulla sua resistenza e sui suoi limiti operativi. L'osservazione e la documentazione di tali pratiche consentono ai designer di comprendere più a fondo la relazione tra il comportamento del materiale e le tecniche di lavorazione (Fig. 9).

Gli studenti integrano tali conoscenze con strumenti propri del progetto contemporaneo, tra cui disegno, sviluppo del concept e modellazione digitale. La collaborazione consente di esplorare nuove geometrie, configurazioni strutturali e tipologie di prodotto a partire dalle proprietà intrinseche dello 'yan-lipao', riducendo la distanza tra pratica artigianale e design industriale.

La modellazione digitale viene introdotta per tradurre le evidenze emerse dalla sperimentazione fisica in proposte più definite, verificando proporzioni, assetti geometrici e possibili vincoli di produzione prima della prototipazione (Fig. 10). I workshop operano quindi come dispositivi di apprendimento reciproco e di selezione progettuale: individuano principi configurativi, soglie di lavorabilità e ipotesi tipologiche da sottoporre a verifica nella fase prototipale.

Sviluppo del prototipo | La fase di sviluppo del prototipo traduce gli esiti emersi nei workshop di co-progettazione in soluzioni progettuali verificabili, attraverso la realizzazione di manufatti che mostrano in che modo lo 'yan-lipao' e le tecniche tradizionali di intreccio possano essere trasferiti in un prodotto di design. A partire dai concept elaborati nella fase collaborativa è stato selezionato un insieme di proposte preliminari da sottoporre a ulteriore sviluppo, sulla base di criteri relativi alla fattibilità strutturale, alla qualità formale, alla producibilità e alla capacità di valorizzare le proprietà intrinseche del materiale. Particolare attenzione è stata inoltre riservata alla possibilità di adattare le logiche dell'intreccio tradizionale a tipologie di prodotto contemporanee, senza compromettere l'autenticità tecnico-culturale del sapere artigianale.

Nel corso dello sviluppo studenti e artigiani hanno definito congiuntamente dettagli costruttivi e strategie di produzione. Attraverso successive iterazioni sono stati calibrati densità delle fibre, schemi strutturali e sistemi di connessione, fino a ottenere manufatti dotati di stabilità, coerenza formale e adeguate prestazioni materico-strutturali.

La realizzazione dei prototipi ha richiesto un'interazione costante tra modellazione digitale e lavorazione artigianale manuale. Gli strumenti di modellazione digitale sono stati impiegati per verificare le proporzioni e le relazioni geometriche, mentre le configurazioni materiche finali sono state realizzate con tecniche tradizionali di intreccio. Questo processo produttivo ibrido mostra come gli strumenti del progetto possano sostenere la reinterpretazione dei metodi di produzione artigianale, senza annullarne la specificità tecnica e culturale.

La Figura 11 sintetizza il passaggio dagli schizzi concettuali e dai modelli digitali ai prototipi fisici. Questa fase fornisce la base empirica della valu-

tazione comparativa successiva, nella quale la trasferibilità delle tecniche artigianali viene discussa alla luce degli esiti realizzati e dei limiti emersi.

Risultati: esiti di prodotto | La presente sezione considera i prototipi come campo di verifica comparativa della versatilità dello 'yan-lipao' e dell'efficacia del processo fondato sull'MDCD. Una prima valutazione indica che i prototipi hanno raggiunto livelli coerenti di stabilità strutturale e di usabilità nelle diverse configurazioni testate, con riscontri positivi da parte dei partecipanti nel corso della fase valutativa. I prototipi sono stati esaminati sulla base di criteri relativi alle prestazioni strutturali, alla qualità estetica, all'usabilità e al potenziale di mercato, restituendo una valutazione multidimensionale del loro assetto progettuale e delle loro potenzialità applicative (n = 4).

Al fine di verificare la versatilità del materiale e l'efficacia del processo MDCD, sono state individuate quattro categorie di prodotto ritenute rappresentative: decorazione d'interni, illuminazione, supporti per l'esposizione e accessori personali; ciascun prototipo mette in evidenza specifiche proprietà strutturali ed espressive dell'intreccio in 'yan-lipao'.

Il primo prototipo è uno specchio decorativo, in cui le strutture intrecciate in 'yan-lipao' sono integrate in una configurazione contemporanea della cornice. Il progetto valorizza la curvatura e la flessibilità del materiale, definendo al contempo un'immagine di leggerezza; gli elementi intrecciati assolvono a una funzione sia decorativa che di rinforzo strutturale della cornice (Fig. 12). Il secondo prototipo esplora invece l'impiego dello 'yan-lipao' nel design dell'illuminazione, in cui la tecnica dell'intreccio viene utilizzata per realizzare una struttura semitrasparente capace di diffondere la luce attraverso il materiale; il prodotto mostra come la tessitura naturale dello 'yan-lipao' possa generare effetti luminosi particolari, mantenendo al contempo adeguate condizioni di stabilità strutturale (Fig. 13).

Il terzo prototipo è una cornice che mette in risalto il potenziale decorativo delle tessiture di intreccio tradizionali; attraverso l'adattamento delle tecniche artigianali a una struttura di supporto rigida, il progetto mostra come l'intreccio in 'yan-lipao' possa essere utilizzato in oggetti decorativi contemporanei senza perdere la propria riconoscibilità culturale (Fig. 14). Il quarto prototipo è una borsa, selezionata per verificare l'adattabilità del materiale ad applicazioni nel settore della moda e degli accessori; in questo caso la flessibilità strutturale dello 'yan-lipao' consente all'oggetto di coniugare leggerezza e resistenza, evidenziando al contempo come le tecniche artigianali tradizionali possano essere trasferite a prodotti coerenti con i mercati di consumo (Fig. 15). Nel loro insieme i prototipi mostrano la capacità dell'intreccio in 'yan-lipao' di essere impiegato in diverse tipologie di prodotto, caratterizzandone i registri espressivi. Più che sancire in modo definitivo la validità del framework, i prototipi circoscrivono le condizioni entro cui l'intreccio in 'yan-lipao' può essere reinterpretato come risorsa progettuale e preparano il terreno per la successiva discussione critica.

Discussione | Sul piano interpretativo i risultati non si esauriscono nella conferma dell'adattabilità dello 'yan-lipao', ma mostrano come questo materiale possa operare come mediatore tra qualità materiche, configurazioni d'uso e costruzione di valore culturale nei processi di design industriale. In tal senso gli esiti della ricerca si collocano in continuità con quegli studi che riconoscono ai materiali di origine biologica un ruolo significativo nello sviluppo sostenibile del prodotto e nelle strategie di progettazione orientate alla circolarità.

Uno dei risultati più rilevanti emersi dalla ricerca riguarda il ruolo della collaborazione tra studenti di design industriale e artigiani. I workshop di coprogettazione hanno infatti attivato uno scambio strutturato di conoscenze, in cui i saperi taciti propri delle pratiche artigianali si sono intrecciati con le metodologie progettuali contemporanee e con gli strumenti di modellazione digitale. Questo modello collaborativo mostra come i sistemi di conoscenza tradizionali possano contribuire in modo efficace ai processi di innovazione, a condizione che siano ricondotti entro dispositivi progettuali formalizzati e metodologicamente controllati.

Lo studio evidenzia inoltre la rilevanza degli approcci progettuali guidati dai materiali nello sviluppo di prodotti sostenibili: quando le proprietà dei materiali vengono assunte come fattore ordinatore del processo progettuale diventa possibile esplorare configurazioni formali e strutturali che emergano direttamente dal comportamento della materia. Nel caso dello 'yan-lipao' la sua flessibilità e la sua propensione all'intreccio hanno reso possibile la realizzazione di manufatti al tempo stesso leggeri e dotati di adeguate prestazioni strutturali.

Dal punto di vista produttivo i risultati suggeriscono che le tecniche artigianali tradizionali possano essere adattate ai sistemi di produzione contemporanei, purché siano sostenute da metodologie progettuali adeguate e da opportuni strumenti digitali. Sebbene la produzione artigianale operi generalmente su scala ridotta, l'integrazione tra ricerca progettuale e sperimentazione materica può agevolarne il trasferimento verso nuove categorie di prodotto, caratterizzate da una maggiore rilevanza sul mercato. In questo senso gli esiti della ricerca contribuiscono anche al dibattito sull'Industria 5.0 che colloca al centro dei sistemi industriali l'integrazione tra creatività umana, conoscenza culturale e innovazione tecnologica. L'approccio ibrido qui proposto mostra infatti come il sapere artigianale possa coesistere con i processi di progettazione digitale, aprendo nuove possibilità per forme di innovazione di prodotto insieme sostenibili e culturalmente consapevoli.

I prototipi sviluppati evidenziano inoltre i potenziali benefici socioeconomici della collaborazione tra artigianato e design. L'estensione dell'impiego di materiali tradizionali a nuovi contesti produttivi può infatti favorire, per le comunità artigianali, l'accesso a nuovi mercati e a ulteriori opportunità economiche; parallelamente i designer possono avvalersi di competenze materiche specifiche e delle narrazioni culturali delle tradizioni artigianali, riconoscendole come risorse attive nel processo di innovazione. Permangono tuttavia alcune criticità: l'adattamento delle tecniche artigianali ai contesti industriali richiede infatti un'attenta considerazione della scalabilità produttiva, del controllo della qualità e dell'accettazione da parte del mercato. In questa prospettiva ulteriori sviluppi della ricerca dovranno esplorare strategie in grado di integrare le reti della produzione artigianale all'interno di filiere industriali più ampie, preservando al contempo l'autenticità e il valore culturale delle pratiche tradizionali. Nel complesso i risultati indicano che l'integrazione tra conoscenze artigianali, materiali di origine biologica e metodi contemporanei di progettazione può sostenere lo sviluppo di prodotti innovativi, coerenti sia con i principi della sostenibilità sia con una visione dello sviluppo industriale centrata sulla persona.

Sinergie e compromessi rispetto agli SDG | Alla luce dei risultati discussi il rapporto con gli SDG non può essere assunto come un semplice allinea-



Fig. 6 | Preparation and conditioning of 'yan-lipao' fibres prior to material experimentation and testing (credit: the Author, 2020).

mento dichiarativo, ma deve essere letto come verifica delle ricadute operative del modello proposto. In particolare l'HCIF e il processo basato sull'MDCD mostrano una chiara convergenza con l'SDG 9 (Industria, innovazione e infrastrutture) e con l'SDG 8 (Lavoro dignitoso e crescita economica), che costituiscono il focus tematico del presente volume della rivista.

Il contributo all'SDG 9 emerge dalla definizione di una metodologia che integra materiali di origine biologica, saperi artigianali e pratiche del design industriale. La sequenza sperimentazione materica, co-progettazione e prototipazione mostra come risorse locali possano generare opportunità di innovazione di prodotto, collegando Patrimonio culturale e sviluppo industriale. Rispetto all'SDG 8, lo studio evidenzia il ruolo delle comunità artigianali nei processi di innovazione e la possibilità di aprire nuove prospettive professionali e di reddito attraverso partnership strutturate con designer e istituzioni formative.

Le sinergie con l'SDG 12 e con l'SDG 13 derivano dall'impiego di un materiale naturale e rinnovabile, dalla valorizzazione di filiere localizzate e dalla riduzione potenziale della dipendenza da materiali sintetici e da catene di approvvigionamento ad alto impatto. Tali effetti devono tuttavia essere verificati caso per caso, poiché le interazioni tra SDG possono produrre esiti positivi e compromessi operativi (Bai et alii, 2024).

Permangono tuttavia alcuni elementi di criticità e di compromesso: una prima questione riguarda la scalabilità della produzione artigianale; se da un lato le tecniche tradizionali incorporano conoscenze culturali e materiali di grande valore, dall'altro spesso si caratterizzano per una capacità produttiva limitata. L'estensione della produzione, senza perdita di autenticità e di qualità esecutiva, richiede pertanto un attento coordinamento tra designer, artigiani e potenziali partner industriali. Un secondo aspetto riguarda il rapporto tra le aspettative di mercato e la standardizzazione del prodotto. La produzione industriale richiede generalmente qualità costante, riproducibilità ed efficienza economica, mentre i processi artigianali tendono ad accogliere la variabilità e la specificità del fare manuale come parte integrante del valore del manufatto. Per eventuali sviluppi della ricerca è necessario approfondire strategie capaci di bilanciare queste logiche differenti mediante modelli produttivi ibridi, nei quali le competenze artigianali siano integrate da un adeguato supporto tecnologico.

Ne consegue che il contributo agli SDG non è lineare né automatico: dipende dalla capacità del progetto di bilanciare identità materica, sostenibilità ambientale, accesso al mercato e tenuta delle filiere locali. Su questo terreno l'HCIF e l'MDCD funzionano come strumenti di orientamento, pur lasciando aperte questioni relative a scalabilità e fattibilità economica.

Limiti, sviluppi futuri e conclusioni | Sebbene la presente ricerca sottolinei il potenziale dell'integrazione tra materiali di origine biologica reperibili in ambito locale e saperi artigianali tradizionali nel design industriale è opportuno esplicitarne con chiarezza alcuni limiti: in primo luogo, la sperimentazione è stata condotta in un contesto di ricerca circoscritto, definito attorno a un solo materiale, lo 'yan-lipao', e al coinvolgimento di un gruppo specifico di artigiani. Se da un lato tale impostazione consente di ricostruire con precisione l'interazione tra conoscenza artigianale e processi di design industriale, dall'altro non autorizza un'estensione immediata dei risultati all'insieme delle tradizioni artigianali o dei materiali di origine biologica.

Un secondo limite riguarda la fase di sviluppo dei prototipi, orientata prevalentemente all'esplorazione degli esiti progettuali anziché alla verifica della fattibilità produttiva su larga scala. Lo studio suggerisce che le tecniche artigianali possano essere reinterpretate e adattate allo sviluppo di prodotti contemporanei; tuttavia, restano necessari ulteriori approfondimenti per comprendere in quale misura tali processi possano operare in contesti industriali più estesi e strutturati. In questa prospettiva le ricerche future potrebbero concentrarsi sull'analisi di modelli produttivi ibridi, capaci di combinare lavorazioni di matrice artigianale con adeguati supporti tecnologici, così da incrementare la capacità produttiva senza compromettere il valore culturale e la specificità tecnica delle pratiche tradizionali.

Un ulteriore limite riguarda la validazione di mercato: benché i prototipi sviluppati evidenzino potenzialità significative sul piano estetico e strutturale, sarebbe necessaria una sperimentazione più estesa, condotta su un campione più ampio di utenti e stakeholder del settore, per valutarne l'effettiva sostenibilità commerciale nel lungo periodo. In tal senso i successivi sviluppi della ricerca dovrebbero includere forme più articolate di valutazione d'uso, analisi del ciclo di vita e verifiche di fattibilità economica, così da chiarire più puntualmente le implicazioni operative dell'integrazione dei materiali artigianali nei mercati del design industriale. Allo stesso modo studi successivi potrebbero applicare l'HCIF e il processo MDCD ad altri materiali locali e ad altre tradizioni artigianali, in differenti contesti geografici, al fine di verificare la trasferibilità del framework proposto e contribuire ulteriormente allo sviluppo di strategie progettuali sostenibili e centrate sulla persona.

Entro tali limiti, la ricerca dimostra che lo 'yan-lipao' può assumere un ruolo progettuale significativo quando il sapere artigianale viene integrato con prove sistematiche, co-progettazione e sviluppo prototipale. I risultati chiariscono il potenziale del materiale senza generalizzare oltre il caso analizzato. Più in generale, l'articolo attribuisce al Design una funzione di mediazione tra sistemi materiali, conoscenza culturale e innovazione industriale. L'HCIF e il processo MDCD offrono una base concettuale e metodologica trasferibile, da verificare in ulteriori contesti geografici, materiali e produttivi.

The transition towards Industry 5.0 represents a significant shift in the paradigm of contemporary industrial production, as it moves beyond a vision centred exclusively on automation efficiency and towards human-centric, sustainable, and resilient production systems. Within this scenario, the design disciplines play a strategic mediating role between technological innovation, environmental responsibility, and sociocultural values. In recent years, bio-based materials have gained increasing prominence as sustainable alternatives to conven-





Fig. 7 | Mechanical testing procedure used to analyse the structural behaviour and flexibility of 'yan-lipao' fibres (credit: the Author, 2020).

Fig. 8 | Analysis of material behaviour during bending and weaving experiments (credit: the Author, 2020).

tional industrial materials, as they contribute to circular economy strategies, reduce dependence on non-renewable resources, and strengthen local supply chains. Despite this potential, their use in contemporary industrial product development processes remains limited.

Within this framework, traditional craft practices constitute a particularly significant, although often marginalised, source of knowledge concerning material behaviour, processing techniques, and the use of local ecological resources. Craft practitioners preserve tacit knowledge accumulated over time and developed through generations of practice; however, this knowledge generally remains confined to small-scale production contexts and rarely enters into dialogue with contemporary industrial design processes. 'Yan-lipao' (Lygodium flexuosum) is a climbing fern traditionally used in Southern Thailand for the production of woven artefacts; the material is valued for its flexibility, strength, and distinctive aesthetic qualities (Fig. 1). Over time, local craft practitioners have developed sophisticated weaving techniques capable of producing objects of considerable formal and constructive refinement (Fig. 2). Nevertheless, the use of 'yan-lipao' remains largely confined to traditional craft markets.

Recent literature has already recognised the potential of integrating craft, digital technologies, and contemporary design practices; however, a reading capable of operationally connecting craft knowledge, material experimentation, and industrial scalability remains less developed. In response to this gap, the research introduces the Hybrid Craft-Industry Innovation Framework (HCIF) as a framework for translating local material knowledge into broader design and production processes. To operationalise this approach, the research develops a Material-Driven Co-Creative Design (MDCD) process that integrates material experimentation, collaboration between industrial design students and craft practitioners, and the use of digital design tools. Through this approach, the study analyses how traditional materials, and 'yan-lipao' in particular, can be reinterpreted and translated into contemporary products.

The research pursues three main objectives: first, to define a human-centric design framework capable of integrating local bio-based materials and traditional craft knowledge within the context of Industry 5.0; second, to develop a co-creative design methodology that encourages dialogue and collaboration between designers and craft practitioners; and, finally, to verify the feasibility of this approach through the development of experimental products.

The article is structured according to a progression consistent with these objectives: the first section reconstructs the theoretical and critical background, examining the literature on Industry 5.0, bio-based materials, and the integration of craft and design; the following sections introduce the HCIF and the MDCD process; the methodological structure and experimental procedures are then described, followed by the presentation and discussion of the outcomes emerging from prototype development. The contribution concludes by reflecting on the limits of the research and on its possible implications for sustainable design and future trajectories of industrial innovation.

The proposed HCIF addresses this fragmentation by integrating bio-based materials, craft knowledge, and co-design into a unified methodological structure oriented towards the transferability of local knowledge into contemporary product development processes. The contribution therefore advances material-driven design and craft-based innovation, offering useful indications for research on sustainable design, circular design, and the trajectories of Industry 5.0.

State of the art and theoretical background | Recent research on sustainable design and Industry 5.0 has progressively clarified how contemporary industrial systems are increasingly required to integrate technological innovation, human creativity, and environmental responsibility. Unlike previous industrial paradigms, which were primarily oriented towards production efficiency and automation, Industry 5.0 promotes a human-centric production model based on collaboration between advanced technologies and human knowledge (European Commission, 2021; Ivanov, 2023; Huang et alii, 2022; Zizic et alii, 2022; Turner and Oyekan, 2023; Ghobakhloo et alii, 2022, 2024; Osello et alii, 2024; Yitmen et alii, 2023). From this perspective, designers assume a particularly significant role, as they act as mediators between cultural knowledge, material innovation, and industrial production processes (Valenti, Trimarchi and Farresin, 2023; Zannoni et alii, 2024).

Within this framework, bio-based materials have attracted increasing attention as sustainable alternatives to conventional industrial materials. Their interest lies in their capacity to contribute to circular economy strategies, reduce dependence on non-renewable resources, and support more localised supply chains (EMF, 2013; Geissdoerfer et alii, 2017; Bocken et alii, 2016; Kirchherr, Reike and Hekkert, 2017; Olivastri and Tagliasco, 2024; Pietroni et alii, 2023). Some studies also underline how such materials can support the development of low-impact products and guide more ecologically responsible design practices (Maffei et alii, 2024; Pradhan et alii, 2024; Morpurgo, 2024). At the same time, a significant strand of the literature on sustainable materials stresses the need to assess environmental impacts throughout the entire life cycle of materials, in order to provide a more rigorous and systemic understanding (Ashby, 2012; McDonough and Braungart, 2002).

The scientific literature also highlights that traditional craft is a relevant source of tacit knowledge concerning materials, production processes, and cultural heritage. Craft practices incorporate a profound understanding of material behaviour that is only rarely adequately formalised or valorised within industrial research (Sennett, 2008; Luckman, 2015). These knowledge systems are therefore relevant not only to cultural conservation, but also to the definition of alternative models of innovation rooted in local contexts and territorial specificities (Manzini, 2015).

Within design research, material-oriented design approaches have progressively recognised an increasingly central role for material experience and experimentation in defining product innovation (Karana, Pedgley and Rognoli, 2014; Karana et alii, 2015; Pedgley, 2014; Giaccardi and Karana, 2015). In this line of inquiry, the material is not considered merely as a technical support or constructive component, but as an active factor in generating qualities of use, perceptual values, and design meanings. Other studies addressing the expressive and experiential dimensions of materials show how designers can generate new forms of product meaning through the exploration of material properties and sensory characteristics (Rognoli, 2010; Rognoli et alii, 2015; Crippa, Rognoli and Levi, 2012).

In parallel, participatory and co-design methodologies have become central approaches in contemporary design research, placing collaboration between designers, users, and stakeholders at the centre as a condition for generating socially relevant innovation (Sanders and Stappers, 2008; Spinuzzi, 2005; Steen, 2013; Porfirione, Ferrari Tumay and Leggiero, 2024). Research on participatory design has further highlighted the value of collaborative experimentation and democratic design processes in addressing complex social problems, confirming that design quality also depends on the capacity to activate structured forms of involvement and exchange between different actors (Binder et alii, 2015; Björgvinsson, Ehn and Hillgren, 2012). In light of these developments, the relationship between traditional craft, contemporary design, and industrial production has emerged as one of the most relevant themes in recent research; this relationship can be interpreted as a field of interaction between cultural knowledge, material experimentation, and industrial innovation (Fig. 3). The literature shows how designers can reinterpret traditional craft techniques through the use of digital technologies, opening up the possibility of new forms of product development that respect cultural heritage while also supporting innovation processes (Dal Falco and Al Azhari, 2024).

Other contributions highlight the role of local production networks and craft communities in industrial transitions oriented towards sustainability: localised material supply chains and craft-based production systems can strengthen regional economies while reducing the environmental impacts associated with globalised production models (Gaddi and Mastrolonardo, 2024). These orientations are consistent with broader sustainability objectives associated with the circular economy, the resilience of production systems, and more socially inclusive forms of innovation (UNEP, 2023; UN, 2024).

Despite these advances, the relationship between craft knowledge, bio-based materials, and industrial product development is still often addressed in a fragmented way. Existing experiences demonstrate the potential of integrating craft knowledge, biomaterials, and digital technologies, but they rarely address the question of scalability and industrial application in a structured manner. The specific contribution of this study therefore lies in proposing a methodological device that makes the transition from craft knowledge to design experimentation and product development both observable and verifiable (Verganti, 2009; Lloyd, 2017).

Hybrid Craft-Industry Innovation Framework | Having established this theoretical framework, the issue no longer lies simply in recognising the value of local materials and knowledge, but in defining a framework capable of making them effectively operational within product innovation processes (European Commission, 2021; Ivanov, 2023). Despite the now widely recognised potential of craft materials and local knowledge, their integration into industrial product development remains limited.

Craft production is generally characterised by small production scales, tacit forms of knowledge, and practices deeply rooted in local contexts; industrial production, by contrast, is based on standardisation, scalability, and technological optimisation. Bringing these two systems into relation therefore requires a different conceptual structure, one capable of connecting cultural knowledge, material performance, and industrial innovation within the same interpretive and operational framework.

In response to this need, the present research proposes the Hybrid Craft-Industry Innovation Framework (HCIF), conceived to support the transformation of indigenous bio-based materials and traditional craft knowledge into resources that can be activated in contemporary industrial design. Rather than replacing craft practices with industrial technologies, the framework aims to construct a hybrid model in which craft knowledge, digital design tools, and industrial production strategies interact to generate new forms of material innovation. The HCIF is organised around four interconnected dimensions – material intelligence, craft preservation, industrial scalability, and market responsiveness (Fig. 4) – which identify the factors considered decisive for enabling the effective integration of craft materials into contemporary product development processes.

The first dimension, material intelligence, concerns the understanding of the physical, mechanical, and aesthetic properties of indigenous materials. Craft practitioners often possess particularly deep experiential knowledge of material behaviour, including aspects such as flexibility, durability, and processing constraints. Integrating this tacit knowledge with systematic material experimentation allows designers to explore new possibilities for design innovation guided by the intrinsic qualities of matter. From this perspective, the material is not considered a passive element to be applied to a predefined idea, but an active component of the design process, capable of orienting its formal, performance-related, and expressive outcomes. A second fundamental dimension is the preservation of craft practices, which, by incorporating cultural identities, historical knowledge, and regional production traditions, constitute cultural heritage of particular value. The inclusion of these components in contemporary design does not perform only a conservative function, but also makes it possible to assign products a specific narrative and aesthetic value rooted in their cultural contexts of origin. In this sense, recent contributions show how the reinterpretation of craft traditions through design can generate innovative outcomes without compromising the cultural authenticity of the practices from which they originate (Dal Falco and Al Azhari, 2024). The third dimension concerns industrial scalability, namely the possibility of translating craft techniques into forms compatible with industrial production systems. Although traditional craft processes are often characterised by a high intensity of manual labour and a strong dependence on context, design methodologies and digital tools can help adapt these techniques to repeatable, controllable, and potentially scalable production processes. In this direction, studies on sustainable industrial transition underline the importance of integrating local production networks and innovative design strategies in order to build more resilient production systems capable of combining territorial embeddedness, flexibility, and innovation (Gaddi and Mastrolonardo, 2024).

The final dimension is market responsiveness and concerns the capacity of products developed through the interaction between craft and industry to engage with the demands of the contemporary market. Effective product innovation does not depend solely on technical feasibility, but also requires aesthetic quality, functional performance, and economic sustainability. In this passage, the role of designers is decisive, as they translate craft knowledge and material experimentation into product solutions capable of responding to the needs, expectations, and value criteria of contemporary consumer contexts. The integration of these four dimensions allows the HCIF to be configured as a conceptual structure capable of supporting collaboration between designers, craft practitioners, and industrial stakeholders. The framework promotes the development of hybrid design strategies in which knowledge of tradition, sustainable materials, and industrial innovation are not treated as separate domains, but as interacting components of a single product development process. From this perspective, the HCIF does not exhaust the theoretical discussion; rather, it defines the criteria for interpreting the operational phases of MDCD and for evaluating their outcomes. More precisely, it functions as a reading and verification device, making observable how the relationship between craft knowledge, material intelligence, production transferability, and market orientation can be translated into a structured design practice.

Process based on Material-Driven Co-Creative Design | The Material-Driven Co-Creative Design (MDCD) process constitutes the operational translation of the HCIF and organises the interaction between designers, craft practitioners, and material experimentation. From this perspective, the material is not selected after the concept has been defined, but acts as the starting point of design innovation, orienting the form, performance, and qualities of use of the product (Correa et alii, 2023).

Within this framework, the MDCD process integrates material experimentation, collaborative design activities, and digital design tools with the aim of translating craft knowledge into contemporary applications of industrial design. The evaluation of material performance is also supported by consolidated Life-Cycle Assessment methodologies and by procedural frameworks based on ISO standards (2006a, 2006b), which provide a struc-



Fig. 9 | Co-creative design workshop involving industrial design students and craft practitioners (credit: the Author, 2021).



Figg. 10, 11 | Prototypes combining digital design exploration and traditional weaving techniques (credits: the Author, 2021).

tured basis for analysing environmental impacts throughout the entire life cycle of materials (Bruijn et alii, 2002); in parallel, integrated assessment approaches are increasingly used to examine complex environmental impacts and benefits within material systems (Sposito and De Giovanni, 2023).

The MDCD process is structured into six iterative phases conceived to allow designers and craft practitioners to progressively develop new product concepts, while maintaining attention to both material behaviour and the cultural knowledge embedded in making practices (Fig. 5).

The first phase is dedicated to material exploration and documentation: at this stage, designers investigate the physical characteristics of the local material, its flexibility, and its structural behaviour. In the case of 'yan-lipao', this phase included direct observation of traditional weaving practices and analysis of how craft practitioners select and prepare the material before processing. Preparation and conditioning operations are also carefully documented in order to understand the parameters that affect the material's performance and its possible applications (Fig. 6).

The second phase concerns material characterisation and experimentation: at this stage, selected samples are subjected to mechanical and structural tests aimed at assessing properties such as flexibility, tensile strength, and durability. The tests produce quantitative information that integrates and makes comparable the empirical knowledge developed by craft practitioners through practice; the mechanical testing procedures are carried out using standardised experimental configurations designed to analyse the structural behaviour of the material under controlled conditions and to provide data useful for subsequent design development (Fig. 7).

The third phase involves co-creative design workshops between industrial design students and craft practitioners: the workshops operate as platforms of exchange between different forms of knowledge. On the one hand, craft practitioners share weaving techniques, processing methods, and skills developed through direct engagement with the material; on the other, students introduce contemporary design methods, concept development practices, and digital modelling tools. The collaborative environment thus constructed encourages the experimentation of new geometries, structural configurations, and product typologies, turning the encounter between traditional knowledge and contemporary tools into a generative device within the design process.

During the fourth phase, digital design tools come into play and are used to translate the evidence and insights emerging from the workshops into increasingly defined product concepts: parametric modelling and digital visualisation allow the exploration of structural configurations derived from traditional weaving arrangements, enabling designers to verify the coherence between form, material behaviour, and realisation potential. Digital modelling also makes it possible to evaluate proportions, geometric arrangements, and possible production constraints before moving to physical prototyping, thereby performing a mediating function between craft experimentation and design verification. The fifth phase is dedicated to prototype development and production: on the basis of the work carried out in the previous phases, a series of experimental prototypes is produced through the joint work of design students and craft practitioners. This phase plays a crucial role, as it enables the research group to verify how traditional craft techniques can be adapted to contemporary product forms without compromising either structural integrity or material authenticity. Prototype production therefore makes observable the transition from material knowledge to its translation into design outcomes characterised by formal, constructive, and applicative coherence.

The concluding phase concerns project evaluation and refinement: the prototypes are analysed in relation to structural performance, aesthetic qualities, and their possible market impact. Observations and feedback from designers, craft practitioners, and potential users are then reinserted into subsequent iterations of the design process in order to guide the progressive improvement of the outcomes. Through this iterative evaluative device, the MDCD methodology enables the gradual refinement of products and helps ensure that the final results remain consistent with the objectives of sustainable, culturally aware, and methodologically grounded design. Rather than restating the proposed model in abstract terms, the following sections test its robustness through three closely connected steps: material characterisation, co-design, and prototype development. It is in the relationship between these three moments that the methodological framework finds its operational verification, showing how the convergence of material intelligence, craft knowledge, and design practices can be translated into a process of innovation that is concretely observable and assessable.

Material characterisation | The material characterisation phase aims to systematically investigate the physical and mechanical properties of 'yan-lipao' in order to support its use in contemporary industrial design processes. Although this material is traditionally used in craft production, its structural behaviour has rarely been analysed through experimental procedures. For this reason, the present research relates the empirical knowledge of craft practitioners to controlled material testing and to a documentary apparatus capable of recording its performance and application potential more rigorously.

Characterisation begins with the preparation and hygrometric stabilisation of the samples: the 'yan-lipao' stems are collected, cleaned, dried, and transformed into fibres suitable for experimentation. The contribution of craft practitioners is decisive in identifying the most appropriate methods of cutting, opening, and preliminary treatment, while control procedures make it possible to obtain samples that are homogeneous in terms of size and moisture content. Mechanical tests measure the material's deformation behaviour and resistance to applied loads, integrating the empirical knowledge of craft practitioners with quantitative data. The study also considers bending, weaving, and structural interlacing operations, since the performance of artefacts depends both on the properties of individual fibres and on their interaction within different weaving configurations.

The analysis confirms some distinctive qualities of 'yan-lipao' – flexibility, lightness, and the capacity to generate complex curved structures – which

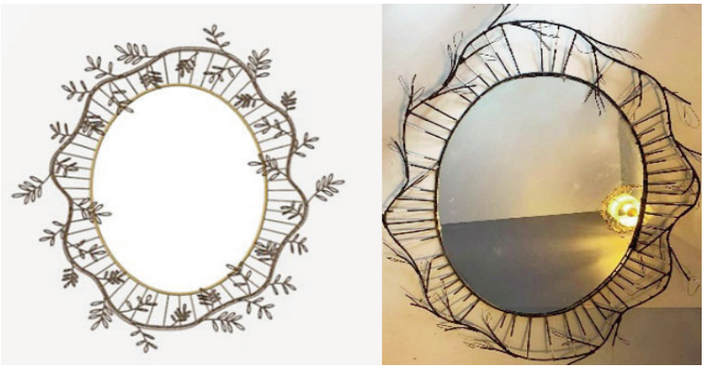


Fig. 12 | Decorative mirror prototype integrating 'yan-lipao' weaving into a contemporary frame structure (credit: the Author, 2021).



Fig. 13 | Lighting fixture prototype demonstrating the use of woven 'yan-lipao' for light diffusion and structural expression (credit: the Author, 2021).

suggest its use in applications attentive to structural resilience and aesthetic quality (Fig. 8). These data constitute the technical basis for the subsequent design exploration.

Co-Creative Design Workshops | The co-creative design workshops constitute a central phase of the research, as they enable direct interaction between industrial design students and craft practitioners. The workshops, in which a total of 10 industrial design students and 5 craft practitioners participated, operate as experimental contexts in which traditional craft knowledge, material exploration, and contemporary design methods converge, with the aim of fostering knowledge exchange and collaborative experimentation oriented towards translating indigenous materials into new product concepts.

Participants were selected on the basis of their experience in craft production and design practice, respectively. The workshop protocol was organised into several phases: material preparation, experimentation with weaving techniques, morphological exploration, and prototype development. Data were collected through direct observation, photographic documentation, and the recording of the different design iterations, while prototype evaluation was conducted according to predefined criteria including structural performance, usability, aesthetic quality, and market potential.

During the workshops, craft practitioners introduced participants to traditional 'yan-lipao' weaving techniques and demonstrated how the material is prepared, manipulated, and structurally organised within the craft production process. This tacit knowledge, developed through extensive practical experience, provides essential indications concerning the material's flexibility, strength, and operational limits. Observation and documentation of these practices allow designers to understand more deeply the relationship between material behaviour and processing techniques (Fig. 9).

Students integrated this knowledge with tools specific to contemporary design, including drawing, concept development, and digital modelling. The collaboration made it possible to explore new geometries, structural configurations, and product typologies starting from the intrinsic properties of 'yan-lipao', thereby reducing the distance between craft practice and industrial design. Digital modelling was introduced to translate the evidence emerging from physical experimentation into more defined proposals, verifying proportions, geometric arrangements, and possible production constraints before prototyping (Fig. 10). The workshops therefore operate as devices for mutual learning and design selection: they identify configurative principles, workability thresholds, and typological hypotheses to be tested in the prototyping phase.

Prototype development | The prototype development phase translates the outcomes emerging from the co-design workshops into verifiable design solutions through the production of artefacts that show how 'yan-lipao' and traditional weaving techniques can be transferred into a contemporary design product. Starting from the concepts developed during the collaborative phase, a set of preliminary proposals was selected for further development on the basis of criteria relating to structural feasibility, formal quality, producibility, and the capacity to valorise the intrinsic properties of the material. Particular attention was also given to the possibility of adapting the logics of traditional weaving to contemporary product typologies without compromising the technical and cultural authenticity of craft knowledge.

During development, students and craft practitioners jointly defined construction details and production strategies. Through successive iterations, fibre density, structural patterns, and connection systems were calibrated until artefacts with stability, formal coherence, and adequate material-structural performance were obtained.

Prototype production required constant interaction between digital modelling and manual craft work. Digital modelling tools were used to verify proportions and geometric relationships, while the final material configurations were produced using traditional weaving techniques. This hybrid production process shows how contemporary design tools can support the reinterpretation of craft production methods without erasing their technical and cultural specificity. Figure 11 summarises the transition from conceptual sketches and digital models to physical prototypes. This phase provides the empirical basis for the subsequent comparative evaluation, in which the transferability of craft techniques is discussed in light of the outcomes produced and the limits identified.

Results: product outcomes | This section considers the prototypes as a field for the comparative verification of the versatility of 'yan-lipao' and the effectiveness of the MDCD-based process. An initial evaluation indicates that the prototypes achieved coherent levels of structural stability and usability across the different configurations tested, with positive feedback from participants during the evaluation phase. The prototypes were examined on the basis of criteria relating to structural performance, aesthetic quality, usability, and market potential, providing a multidimensional assessment of their design configuration and application potential (n = 4).

In order to verify the versatility of the material and the effectiveness of the MDCD process, four representative product categories were identified: interior decoration, lighting, display supports, and personal accessories. Each prototype highlights specific structural and expressive properties of 'yan-lipao' weaving.

The first prototype is a decorative mirror in which woven 'yan-lipao' structures are integrated into a contemporary frame configuration. The design enhances the curvature and flexibility of the material while defining an image of lightness; the woven elements perform both a decorative function and a structural reinforcement function for the frame (Fig. 12). The second prototype explores the use of 'yan-lipao' in lighting design, where the weaving technique is used to produce a semi-transparent structure capable of diffusing light through the material; the product shows how the natural texture of 'yan-lipao' can generate distinctive lighting effects while maintaining adequate structural stability (Fig. 13).

The third prototype is a picture frame that highlights the decorative potential of traditional woven textures. Through the adaptation of craft techniques to a rigid support structure, the design shows how 'yan-lipao' weaving can be used in contemporary decorative objects without losing its cultural recognisability (Fig. 14). The fourth prototype is a bag, selected to test the material's adaptability to applications in fashion and accessory design; in this case, the structural flexibility of 'yan-lipao' allows the object to combine lightness and strength, while also demonstrating how traditional craft techniques can be transferred to products consistent with contemporary consumer markets (Fig. 15).

Taken together, the prototypes demonstrate the capacity of 'yan-lipao' weaving to be used across different product typologies, characterising their expressive registers. Rather than definitively

validating the framework, the prototypes define the conditions under which 'yan-lipao' weaving can be reinterpreted as a design resource and prepare the ground for the subsequent critical discussion.

Discussion | Interpretively, the results are not limited to confirming the adaptability of 'yan-lipao'; they also show how this material can act as a mediator between material qualities, use configurations, and the construction of cultural value within contemporary industrial design processes. In this sense, the outcomes of the research are consistent with studies that recognise bio-based materials as having a significant role in sustainable product development and in design strategies oriented towards circularity.

One of the most significant results emerging from the research concerns the role of collaboration between industrial design students and craft practitioners. The co-design workshops activated a structured exchange of knowledge in which the tacit knowledge embedded in craft practices was interwoven with contemporary design methodologies and digital modelling tools. This collaborative model shows how traditional knowledge systems can contribute effectively to innovation processes, provided that they are brought within formalised and methodologically controlled design devices.

The study also highlights the relevance of material-driven design approaches in the development of sustainable products: when material properties are assumed as an organising factor of the design process, it becomes possible to explore formal and structural configurations that emerge directly from the behaviour of matter. In the case of 'yan-lipao', its flexibility and suitability for weaving enabled the production of artefacts that are both lightweight and endowed with adequate structural performance.

From a production perspective, the results suggest that traditional craft techniques can be adapted to contemporary production systems, provided that they are supported by appropriate design methodologies and suitable digital tools. Although craft production generally operates on a limited scale, the integration of design research and material experimentation can facilitate its transfer towards new product categories with greater market relevance. In this sense, the research outcomes also contribute to the debate on Industry 5.0, which places the integration of human creativity, cultural knowledge, and technological innovation at the centre of industrial systems. The hybrid approach proposed here shows how craft knowledge can coexist with digital design processes, opening up new possibilities for forms of product innovation that are both sustainable and culturally aware. The prototypes developed also highlight the potential socioeconomic benefits of collaboration between craft and design. Extending the use of traditional materials to new production contexts can provide craft communities with access to new markets and additional economic opportunities; in parallel, designers can draw on specific material expertise and the cultural narratives of craft traditions, recognising them as active resources within the innovation process.

Some critical issues nevertheless remain: the adaptation of craft techniques to industrial contexts requires careful consideration of production scalability, quality control, and market acceptance. From this perspective, further research developments will need to explore strategies capable of integrating craft production networks into broader industrial supply chains while preserving the authenticity and cultural value of traditional practices. Overall, the results indicate that the integration of craft knowledge, bio-based materials, and contemporary design methods can support the development of innovative products consistent with both the principles of sustainability and a human-centric vision of industrial development.

Synergies and trade-offs in relation to the SDGs | In light of the results discussed, the relationship with the SDGs cannot be understood as a merely declarative alignment; rather, it must be read as a verification of the operational impacts of the proposed model. In particular, the HCIF and the MDCD-based process show a clear convergence with SDG 9 (Industry, Innovation and Infrastructure) and SDG 8 (Decent Work and Economic Growth), which constitute the thematic focus of this journal issue.

The contribution to SDG 9 emerges from the definition of a methodology that integrates bio-based materials, craft knowledge, and industrial design practices. The sequence of material experimentation, co-design, and prototyping shows how local resources can generate opportunities for product innovation, connecting cultural heritage and industrial development. With respect to SDG 8, the study highlights the role of craft communities in innovation processes and the possibility of opening new professional and income opportunities through structured partnerships with designers and educational institutions. The synergies with SDG 12 and SDG 13 derive from the use of a natural and renewable material, the valorisation of localised supply chains, and the potential reduction of dependence on synthetic materials and high-impact supply chains. These effects must nevertheless be verified case by case, since interactions between SDGs can generate both positive outcomes and operational trade-offs (Bai et alii, 2024).

Some critical elements and trade-offs nevertheless remain: a first issue concerns the scalability of craft production. While traditional techniques incorporate cultural knowledge and materials of considerable value, they are often characterised by limited production capacity. Expanding production without losing authenticity and executive quality therefore requires careful coordination between designers, craft practitioners, and potential industrial partners.

A second aspect concerns the relationship between market expectations and product standardisation. Industrial production generally requires consistent quality, reproducibility, and economic efficiency, whereas craft processes tend to embrace variability and the specificity of manual making as integral parts of the artefact's value. Future research developments will need to examine strategies capable of balancing these different logics through hybrid production models in which craft skills are integrated with adequate technological support. It follows that the contribution to the SDGs is neither linear nor automatic: it depends on the project's capacity to balance material identity, environmental sustainability, market access, and the robustness of local supply chains. On this terrain, the HCIF and MDCD function as orienting tools, while leaving open questions relating to scalability and economic feasibility.

Limits, Future Developments, and Conclusions | Although the present research underlines the potential of integrating locally available bio-based materials and traditional craft knowledge into contemporary industrial design, some limitations should be made explicit. First, the experimentation was conducted within a circumscribed research context, defined around a single material, 'yan-lipao', and the involvement of a specific group of craft practitioners. While this approach makes it possible to reconstruct with precision the interaction between craft knowledge and industrial design processes, it does not justify an immediate extension of the results to all craft traditions or bio-based materials.



Fig. 14 | Picture frame prototype highlighting the decorative potential of traditional 'yan-lipao' weaving patterns (credit: the Author, 2021).

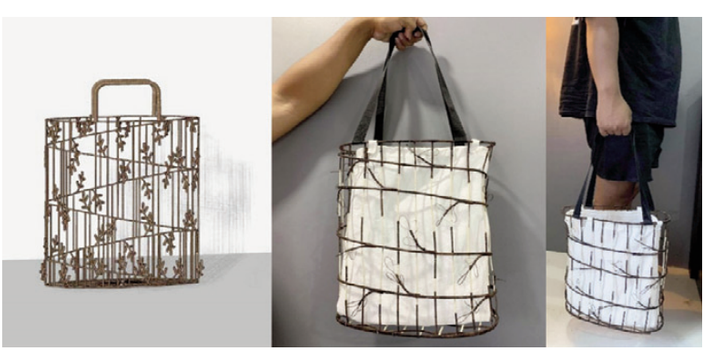


Fig. 15 | Carry bag prototype illustrating the application of 'yan-lipao' material in fashion and accessory design (credit: the Author, 2021).

A second limitation concerns the prototype development phase, which was primarily oriented towards the exploration of design outcomes rather than the verification of large-scale production feasibility. The study suggests that craft techniques can be reinterpreted and adapted to the development of contemporary products; however, further investigation is needed to understand the extent to which these processes can operate in broader and more structured industrial contexts. From this perspective, future research could focus on the analysis of hybrid production models capable of combining craft-based processes with adequate technological support, thereby increasing production capacity without compromising the cultural value and technical specificity of traditional practices.

A further limitation concerns market validation: although the prototypes developed show significant aesthetic and structural potential, more extensive experimentation, conducted on a larger sample of users and sector stakeholders, would be required to assess their effective long-term commercial sustainability. In this sense, subsequent research developments should include more articulated forms of use evaluation, life-cycle assessment, and economic feasibility testing, in order to clarify more precisely the operational implications of integrating craft materials into industrial design markets. Similarly, later studies could apply the HCIF and MDCD process to other local materials and other craft traditions in different geographical contexts, in order to verify the transferability of the proposed framework and contribute further to the development of sustainable and human-centric design strategies.

Within these limits, the research demonstrates that 'yan-lipao' can assume a significant design role when craft knowledge is integrated with systematic testing, co-design, and prototype development. The results clarify the material's potential without generalising beyond the case analysed. More broadly, the article assigns Design a mediating function between material systems, cultural knowledge, and industrial innovation. The HCIF and MDCD process offer a transferable conceptual and methodological basis to be verified in further geographical, material, and production contexts.

Acknowledgements

The Author gratefully acknowledges the financial and institutional support provided by the Plant Genetic Conservation Project under the Royal Patronage of Her Royal Highness Princess Maha Chakri Sirindhorn (PGCP) for the fiscal year 2020, Walailak University.

The Author also wishes to express sincere appreciation to local artisans, community members, industrial design students, designers, and all stakeholders involved in the co-creative process, whose knowledge, skills and collaborative engagement were essential to the development of this research. Their contributions have been instrumental in advancing the integration of traditional craft materials into contemporary industrial design practices, supporting the development of innovative and sustainable Industry 5.0 products.

References

Ashby, M. F. (2012), *Materials and the Environment – Eco-informed Material Choice*, Butterworth-Heinemann, Oxford.

Bai, L., Wang, X., Zhang, L., Feng, J., Liao, J., Chen, B., Wang, P. and Zhang, X. (2024), "A systematic study of interactions between sustainable development goals (SDGs) in Hainan Island", in *Scientific Reports*, vol. 14, article 26613, pp. 1-17. [Online] Available at: doi.org/10.1038/s41598-024-77984-5 [Accessed 19 March 2026].

Binder, T., Brandt, E., Ehn, P. and Halse, J. (2015), "Democratic design experiments – Between parliament and laboratory", in *CoDesign | International Journal of CoCreation in Design and the Arts*, vol. 11, issue 3-4, pp. 152-165. [Online] Available at: doi.org/10.1080/15710882.2015.10 81248 [Accessed 19 March 2026].

Björgvinsson, E., Ehn, P. and Hillgren, P.-A. (2012), "Design things and design thinking – Contemporary participatory design challenges", in *Design Issues*, vol. 28, issue 3, pp. 101-116. [Online] Available at: doi.org/10.1162/DESI_a_00165 [Accessed 19 March 2026].

Bocken, N. M. P., de Pauw, I., Bakker, C. and van der Grinten, B. (2016), "Product design and business model strategies for a circular economy", in *Journal of Industrial and Production Engineering*, vol. 33, issue 5, pp. 308-320. [Online] Available at: doi.org/10.1080/21681015.2016.1172124 [Accessed 19 March 2026].

Bruijn, H., Duin, R., Huijbregts, M. A. J., Guinee, J. B., Gorree, M., Heijungs, R., Huppes, G., Kleijn, R., Koning, A., Oers, L., Wegener Sleeswijk, A., Suh, S. and Udo de Haes, H. A. (eds) (2002), *Handbook on Life Cycle Assessment – Operational Guide to the ISO Standards*, Springer, Dordrecht. [Online] Available at: doi.org/10.1007/0-306-48055-7 [Accessed 19 March 2026].

Correa, D., Bianconi, F., Filippucci, M. and Pelliccia, G. (2023), "Pattern modulari nel design igroscopico con stampa 4D – Forma e programmazione del materiale | Modular patterns in hygroscopic 4D printing design – Form and programming of the material", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 14, pp. 264-273. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/14222023 [Accessed 19 March 2026].

Crippa, V., Rognoli, V. and Levi, M. (2012), "Materials and emotions – A study on the relations between materials and emotions in industrial products", in Brassett, J., Hekkert, P., Ludden, G., McDonnell, J. and Malpass, M. (eds), *Out of Control – Book of Abstract– Proceedings of 8th International Design and Emotion Conference, Central Saint Martins University of Art & Design, London, England, September 11-14, 2012*, Central Saint Martins University of the Arts, London, pp. 1-8. [Online] Available at: researchgate.net/publication/287477143_Materials_and_emotions_A_study_on_the_relations_between_materials_and_emotions_in_industrial_products [Accessed 10 March 2026].

Dal Falco, F. and Al Azhari, O. (2024), "Complessità e significati del mashrabiya nelle arti islamiche tra tradizione e innovazione digitale | Complexity and meanings of the mashrabiya in the Islamic arts between tradition and digital innovation", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 16, pp. 290-303. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/16242024 [Accessed 19 March 2026].

EMF – Ellen MacArthur Foundation (2013), *Towards the Circular Economy – Economic and business rationale for an accelerated transition*. [Online] Available at: content.ellenmacarthurfoundation.org/m/27265af68f11ef30/original/Towards-the-circular-economy-Vol-1.pdf [Accessed 19 March 2026].

European Commission – Directorate General for Research and Innovation (2021), *Industry 5.0 – Towards a Sustainable, Human-centric and Resilient European Industry*, Publications Office of the European Union, Luxembourg. [Online] Available at: data.europa.eu/doi/10.2777/308407 [Accessed 19 March 2026].

Gaddi, R. and Mastrolonardo, L. (2024), "Micro-reti locali per la transizione verde della filiera della lana | Local micro-networks for green transition of the wool supply chain", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 15, pp. 344-353. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/15292024 [Accessed 19 March 2026].

Geissdoerfer, M., Savaget, P., Bocken, N. M. P. and Hultink, E. J. (2017), "The Circular Economy – A new sustainability paradigm?", in *Journal of Cleaner Production*, vol. 143, pp. 757-768. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.048 [Accessed 19 March 2026].

Ghobakhloo, M., Amoozad Mahdiraji, H., Iranmanesh, M. and Jafari-Sadeghi, V. (2024), "From Industry 4.0 Digital Manufacturing to Industry 5.0 Digital Society – A Roadmap Toward Human-Centric, Sustainable, and Resilient Production", in *Information Systems Frontiers | A Journal of Research and Innovation*, vol. 26, issue 1, pp. 1-33. [Online] Available at: doi.org/10.1007/s10796-024-10476-z [Accessed 19 March 2026].

Ghobakhloo, M., Iranmanesh, M., Mubarak, M. F., Mubarik, M., Rejeb, A. and Nilashi, M. (2022), "Identifying industry 5.0 contributions to sustainable development – A strategy roadmap for delivering sustainability values", in *Sustainable Production and Consumption*, vol. 33, pp. 716-737. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.spc.2022.08.003 [Accessed 19 March 2026].

Giaccardi, E. and Karana, E. (2015), "Foundations of materials experience – An approach for HCI", in Brown, D. and Kim, J. (eds), *CHI 2015 – Proceedings of the 33rd Annual CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, Seoul, Republic of Korea, April 18-23, 2015*, Association for Computing Machinery, New York, NY, pp. 2447-2456. [Online] Available at: doi.org/10.1145/2702123.2702337 [Accessed 19 March 2026].

Huang, S., Wang, B., Li, X., Zheng, P., Mourtzis, D. and Wang, L. (2022), "Industry 5.0 and Society 5.0 – Comparison, complementation and co-evolution", in *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 64, pp. 424-428. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.jmsy.2022.07.010 [Accessed 19 March 2026].

ISO – International Organization for Standardization (2006a), *ISO 14040:2006 – Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework*, International Organization for Standardization, Geneva. [Online] Available at: iso.org/standard/37456.html [Accessed 19 March 2026].

ISO – International Organization for Standardization (2006b), *ISO 14044:2006 – Environmental management – Life cycle assessment – Requirements and guidelines*, International Organization for Standardization, Geneva. [Online] Available at: iso.org/standard/38498.html [Accessed 19 March 2026].

Ivanov, D. (2023), "The Industry 5.0 framework – Viability-based integration of the resilience, sustainability, and human-centricity perspectives", in *International Journal of Production Research*, vol. 61, issue 5, pp. 1683-1695. [Online] Available at: doi.org/10.1080/00207543.2022.2118892 [Accessed 19 March 2026].

Karana, E., Barati, B., Rognoli, V. and Zeeuw van der Laan, A. (2015), "Material Driven Design (MDD) – A method to design for material experiences", in *International Journal of Design*, vol. 9, issue 2, pp. 35-54. [Online] Available at: ijdesign.org/index.php/IJDesign/article/view/1965 [Accessed 19 March 2026].

Karana, E., Pedgley, O. and Rognoli, V. (eds) (2014), *Materials Experience – Fundamentals of Materials and Design*, Butterworth-Heinemann, Oxford.

Kirchherr, J., Reike, D. and Hekkert, M. (2017), "Conceptualizing the circular economy – An analysis of 114 definitions", in *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 127, pp. 221-232. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.09.005 [Accessed 19 March 2026].

Lloyd, P. (2017), "From design methods to future-focused thinking – 50 years of design research", in *Design Studies*, vol. 48, pp. A1-A8. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.destud.2016.12.004 [Accessed 19 March 2026].

Luckman, S. (2015), *Craft and the Creative Economy*, Palgrave Macmillan, London. [Online] Available at: doi.org/10.1057/9781137399687 [Accessed 19 March 2026].

Maffei, S., Bolzan, P., Bianchini, M., Zeccara, F., Barbero, S., Campagnaro, C., Di Prima, N., Filippini, A., Puglielli, M., Rosato, L., Lotti, G. and Pontillo, G. (2024), "Svelare la complessità della transizione circolare per il settore del mobile imbottito | Unveiling the complexity of circular transition for the upholstered furniture sector", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 16, pp. 304-313. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/16252024 [Accessed 19 March 2026].

Manzini, E. (2015), *Design, When Everybody Designs – An Introduction to Design for Social Innovation*, The MIT Press, Cambridge (MA).

McDonough, W. and Braungart, M. (2002), *Cradle to Cradle – Remaking the Way We Make Things*, North Point Press, New York (NY).

Morpurgo, E. (2024), "Biomateriali e zone umide – Filiere per l'edilizia e il tessile dalla valorizzazione di ecosistemi locali | Biomaterials and wetlands – Supply chains for construction and textiles through the enhancement of local ecosystems", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 16, pp. 314-323. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/16262024 [Accessed 19 March 2026].

Olivastri, C. and Tagliasco, G. (2024), "Servizi per il riuso e il riparo – L'allestimento tra touchpoints e infrastrutture relazionali | Services for reuse and repair – The arrangement between touchpoints and relational infrastructures", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 15, pp. 324-331. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/15272024 [Accessed 19 March 2026].

Osello, A., Del Giudice, M., Donato, A. J. and Fratto, A. (2024), "Verso la Neutralità Climatica – Il ruolo chiave del Digital Twin nell'Industria 5.0 | Towards Climate Neutrality – The key role of the Digital Twin in Industry 5.0", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 15, pp. 276-285. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/15222024 [Accessed 19 March 2026].

Pedgley, O. (2014), "Chapter 24 – Materials Selection for Product Experience – New Thinking, New Tools", in Karana, E., Pedgley, O. and Rognoli, V. (eds), *Materials Experience – Fundamentals of Materials and Design*, pp. 337-349. [Online] Available at: doi.org/10.1016/B978-0-08-099359-1.00024-2 [Accessed 19 March 2026].

Pietroni, L., Di Stefano, A. and Galloppo, D. (2023), "Il design modulare verso l'economia circolare – Dal 'fare per disfare' al 'fare per rifare' | Modular design towards the circular economy – From 'making to unmake' to 'making to remake'", *in Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 14, pp. 274-283. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/14232023 [Accessed 19 March 2026].

Porfirione, C., Ferrari Tumay, X. and Leggiero, I. (2024), "Conoscenza, innovazione e cambiamento – Il potere dell'errore nel design e nei sistemi complessi | Knowledge, innovation, and change – The power of error in design and complex systems", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 16, pp. 232-241. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/16202024 [Accessed 19 March 2026].

Pradhan, P., Weitz, N., Daioglou, V., Abrahão, G. M., Allen, C., Ambrósio, G., Arp, F., Asif, F., Bennich, T., Benton, T. G., Biermann, F., Cao, M., Carlsen, H., Chen, F., Chen, M., Daams, M., Dawes, J. H. P., Dhakal, S., Gilmore, E., González, L. J. M., Hubacek, K., Hu, Y., Jager, W., Samir, K. C., Kearney, N. M., Khot, U. A., Kluck, T., Kulkarni, S., Leininger, J., Li, C., Li, J., Lotze-Campen, H., Parrado-Hernando, G., Pedercini, M., Phuyal, R. K., Prell, C., Rijal, A., Schweizer, V., Sijtsma, F. J., Soergel, B., Spittler, N., van Vuuren, D., Warchold, A., Weber, E., Wicke, B., Widerberg, O., Wilts, R., Wingens, C., Wu, C., Xing, Q., Yan, J., Yuan, Z., Zhou, X. and Zimm, C. (2024), "Three foci at the science-policy interface for systemic Sustainable Development Goal acceleration", in *Nature Communications*, vol. 15, article 8600, pp. 1-4. [Online] Available at: doi.org/10.1038/s41467-024-52926-x [Accessed 19 March 2026].

Rognoli, V. (2010), "A broad survey on expressive-sensorial characterization of materials for design education", in *METU | Journal of the Faculty of Architecture*, vol. 27, issue 2, pp. 287-300. [Online] Available at: doi.org/10.4305/METU.JFA.2010.2.16 [Accessed 19 March 2026].

Rognoli, V., Bianchini, M., Maffei, S. and Karana, E. (2015), "DIY materials", in *Materials and Design*, vol. 86, pp. 692-702. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.matdes.2015.07.020 [Accessed 19 March 2026].

Sanders, E. B.-N. and Stappers, P. J. (2008), "Co-creation and the new landscapes of design", in *CoDesign | International Journal of CoCreation in Design and the Arts*, vol. 4, issue 1, pp. 5-18. [Online] Available at: doi.org/10.1080/15710880701875068 [Accessed 19 March 2026].

Sennett, R. (2008), *The Craftsman*, Yale University Press, New Haven (CT).

Spinuzzi, C. (2005), "The methodology of participatory design", in *Technical Communication*, vol. 52, issue 2, pp. 163-174. [Online] Available at: ingentaconnect.com/contentone/stc/tc/2005/00000052/00000002/art00005 [Accessed 19 March 2026].

Sposito, C. and De Giovanni, G. (2023), "Affrontare la complessità – Integrare LCA, ERA ed ESA per valutare impatti e benefici antropici sulla biosfera | Dealing with complexity – Integrating LCA, ERA and ESA to assess human impacts and benefits on the biosphere", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 14, pp. 12-39. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/1412023 [Accessed 19 March 2026].

Steen, M. (2013), "Co-design as a process of joint inquiry and imagination", in *Design Issues*, vol. 29, issue 2, pp. 16-28. [Online] Available at: doi.org/10.1162/DESI_a_00207 [Accessed 19 March 2026].

Turner, C. and Oyekan, J. (2023), "Manufacturing in the Age of Human-Centric and Sustainable Industry 5.0 – Application to Holonic, Flexible, Reconfigurable and Smart Manufacturing Systems", in *Sustainability*, vol. 15, issue 13, article 10169, pp. 1-29. [Online] Available at: doi.org/10.3390/su151310169 [Accessed 19 March 2026].

UN – United Nations | Department of Economic and Social Affairs (2024), *Synergy Solutions for Climate and SDG Action – Bridging the Ambition Gap for the Future We Want – Report on strengthening evidence base*, United Nations, New York (NY). [Online] Available at: sdgs.un.org/sites/default/files/2024-08/UN%20Synergy%20Solutions%20for%20Climate%20and%20SDG%20Action-4_0.pdf [Accessed 19 March 2026].

UNEP – United Nations Environment Programme (2023), *Turning off the Tap – How the world can end plastic pollution and create a circular economy*, UNEP, Nairobi. [Online] Available at: wedocs.unep.org/handle/20.500.11822/42277 [Accessed 19 March 2026].

Valenti, A., Trimarchi, A. and Farresin, S. (2023), "Design e pensiero ecologico – Le nuove narrative del progetto contemporaneo che mettono la Terra in primo piano | Design and ecological thinking – The new narratives of contemporary design placing Earth on centre stage", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 13, pp. 19-30. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/1312023 [Accessed 19 March 2026].

Verganti, R. (2009), *Design-Driven Innovation – Changing the Rules of Competition by Radically Innovating What Things Mean*, Harvard Business Press, Boston (MA).

Yitmen, I., Alizadehsalehi, S. and Almusaed, A. (2023), "Investigating the casual relationships among enablers of the construction 5.0 paradigm – Integration of Operator 5.0 and Society 5.0 with Human-Centric Smart Production and Logistics", in *Sustainability*, vol. 15, issue 11, article 9105, pp. 1-25. [Online] Available at: doi.org/10.3390/su15119105 [Accessed 19 March 2026].

Zannoni, M., Succini, L., Rosato, L. and Pasini, V. (2024), "Transitional industrial designer – La responsabilità di progettisti e imprese per una transizione sostenibile | Transitional industrial designer – The responsibility of designers and companies for a sustainable transition", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 15, pp. 332-343. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/15282024 [Accessed 19 March 2026].

Zizic, M. C., Mladineo, M., Gjeldum, N. and Celent, L. (2022), "From Industry 4.0 towards Industry 5.0 – A Review and Analysis of Paradigm Shift for the People, Organization and Technology", in *Energies*, vol. 15, issue 14, article 5221, pp. 1-20. [Online] Available at: doi.org/10.3390/en15145221 [Accessed 19 March 2026].

AGATHÓN – International Journal of Architecture, Art and Design | n. 19 | 2026 | pp. 464-481
ISSN print: 2464-9309 – ISSN online: 2532-683X | doi.org/10.69143/2464-9309/19272026

Article Info

Received 10 March 2026
Revised 16 April 2026
Accepted 22 April 2026
Published 30 June 2026

BICICLETTE E CARGO BIKE
Modelli ibridi modulari per micromobilità urbana e logistica

BICYCLES AND CARGO BIKES
Hybrid modular models for urban micromobility and logistics

Alessandra Rinaldi, Jonathan Lagrimino

Abstract

Il contributo esplora la modularità come leva progettuale per integrare micromobilità personale e logistica. Assumendo come caso studio di partenza un veicolo leggero modulare sviluppato nell'ambito del Centro Nazionale per la Mobilità Sostenibile (Spoke 5 'Light Vehicle and Active Mobility') la ricerca adotta un approccio Design Thinking e un modello Double Diamond, combinando l'analisi della letteratura, il confronto con esperti, l'uso di fattori ricorrenti e lo sviluppo di scenari. Ne risultano un framework interpretativo fondato su cinque fattori chiave dei sistemi di micromobilità urbana e la proposta di un modello di Hybrid Professional Micromobility, in cui la riconfigurabilità del veicolo abilita usi ibridi tra spostamenti quotidiani e servizi di prossimità. I risultati evidenziano implicazioni rilevanti su flessibilità d'uso, gestione della flotta e riconfigurazione dei servizi.

This paper explores modularity as a design lever for integrating personal micromobility and logistics. Taking as its starting case study a modular light vehicle developed within the framework of the National Centre for Sustainable Mobility (Spoke 5 'Light Vehicle and Active Mobility'), the research adopts a Design Thinking approach and a Double Diamond model, combining literature analysis, expert consultation, the use of recurring factors, and scenario development. The results consist of an interpretative framework based on five key factors of urban micromobility systems and a proposal for a Hybrid Professional Micromobility model, in which the vehicle's reconfigurability enables hybrid use between everyday mobility and proximity services. The findings highlight significant implications for flexibility of use, fleet management, and service reconfiguration.

Keywords

micromobilità urbana, veicoli leggeri modulari, cargo bike, logistica di ultimo miglio, mobilità ibrida

urban micromobility, modular light vehicles, cargo bikes, last-mile logistics, hybrid mobility

Alessandra Rinaldi, Architect and PhD, is an Associate Professor of Design at the Department of Architecture of the University of Florence (Italy) and the Director of IDEE LAB (Innovation in Design and Engineering Laboratory). Her research focuses on innovation in product design, ergonomics, and interaction design, adopting approaches based on Design Thinking, Human-centred Design, Design for Inclusion, and experience-based innovation. E-mail: alessandra.rinaldi@unifi.it

Jonathan Lagrimino, Designer and PhD, is a Researcher at the Department of Architecture of the University of Florence (Italy) and a member of IDEE LAB (Innovation in Design and Engineering Laboratory). His research focuses on product and product-service system innovation in the field of design for sustainable mobility, with particular attention to ergonomics and human interaction. E-mail: jonathan.lagrimino@unifi.it



La mobilità urbana contemporanea è chiamata ad affrontare sfide ambientali, sociali ed economiche complesse che richiedono l'adozione di paradigmi innovativi, sostenibili, intelligenti, flessibili e inclusivi (Bruno et alii, 2024; European Commission, 2019). In questo quadro la micromobilità rappresenta una componente strategica dei sistemi di trasporto urbano (Abduljabbar, Liyanage and Dia, 2021): i veicoli leggeri, tra cui biciclette e cargo bike, costituiscono infatti soluzioni a basso consumo energetico e a basse emissioni, particolarmente efficaci su scala locale, in contesti caratterizzati da vincoli infrastrutturali, prossimità funzionale e alta densità (Arias-Molinares et alii, 2023; Buehler and Pucher, 2021; Eom, Lee and Lee, 2023). Proprio per queste proprietà gli effetti della micromobilità non si misurano solo in termini ambientali, ma anche sociali ed economici: essa contribuisce infatti a ridurre la dipendenza dai veicoli motorizzati tradizionali, a rendere i servizi urbani più accessibili e i modelli distributivi più efficienti e a promuovere forme di mobilità attiva più salutari (Abduljabbar, Liyanage and Dia, 2021; Martens, 2007; Van Cauwenberg et alii, 2019).

Il dibattito sulla micromobilità urbana si è sviluppato prevalentemente in chiave sistemica, con attenzione alla pianificazione infrastrutturale, ai modelli di servizio, alla regolamentazione e alla costruzione di ecosistemi di mobilità integrata. In tale prospettiva la micromobilità viene interpretata come un sistema collettivo e interconnesso, nel quale infrastrutture, servizi e tecnologie concorrono a definire assetti multimodali e adattivi (Canessa and Centanaro, 2024; Fabbri, 2023; Luo, Li and Hampshire, 2021; Sommariva and Canessa, 2024).

Parallelamente a questa lettura risulta però necessario considerare anche la scala del prodotto, intesa come livello progettuale abilitante, in cui soluzioni tecniche e tecnologiche possono agire come leve bottom-up capaci di incidere sui modelli di mobilità urbana (La Regina et alii, 2025; Schomakers et alii, 2022). In questa direzione si colloca la ricerca sviluppata nell'ambito del Centro Nazionale per la Mobilità Sostenibile[1] (Spoke 5 – Light Vehicle and Active Mobility; Work Package 2.1 – Vehicle Design, Materials and LCA), orientata alla progettazione e prototipazione di biciclette e cargo bike e all'esplorazione della modularità come leva strategica di innovazione (Rinaldi and Lagrimino, 2026).

Nel settore ciclistico il principio modulare trova un terreno particolarmente maturo: gran parte dei componenti della bicicletta è regolata da standard tecnici internazionali consolidati da decenni, rendendo questo ambito uno dei casi più longevi di interoperabilità modulare nella progettazione di prodotto (Galvin and Morkel, 2001). Tale tradizione di standardizzazione e componibilità suggerisce un'evidente estensione di scala: se la modularità struttura l'architettura tecnica del veicolo, essa costituisce anche una chiave strategica per incidere sulle configurazioni produttive, distributive e d'uso. In questa direzione si colloca la riflessione di Pietroni, Di Stefano e Galloppo (2023) che evidenziano il passaggio da una logica del 'fare per disfare' a una logica del 'fare per rifare' secondo la quale la modularità assume una duplice valenza: da un lato dispositivo tecnico-progettuale per lo sviluppo di prodotti flessibili e configurabili, dall'altro modello organizzativo capace di incidere sui processi industriali, sulla filiera di approvvigionamento e sui modelli d'impresa.

Questa duplice natura può essere letta anche attraverso il modello teorico proposto da Carliss Y. Baldwin e Kim B. Clark (1994) che distingue tre livelli interconnessi di modularità: Modularity in Design (MiD), Modularity in Production (MiP) e Modularity in Use (MiU). In questa prospettiva la modularità non si limita alla scomposizione tecnica di un artefatto (MiD), ma si configura come un principio progettuale capace di mettere in relazione la struttura del prodotto con l'organizzazione produttiva (MiP) e le pratiche d'uso (MiU). In altri termini, come osservano anche Tamborrini e Cretaio (2023), il modulo acquista senso non come elemento isolato, ma nelle relazioni che instaura entro un sistema più ampio e adattivo, estendendo così la modularità dalla scala dell'artefatto a quella del sistema.

Tali assunti hanno trovato applicazione nello sviluppo di un veicolo leggero 4-in-1 (Figg. 1-4) ideato nell'ambito del progetto MOST-Spoke 5. Il veicolo è stato concepito come un sistema riconfigurabile basato su moduli strutturali indipendenti (Fig. 5), connessi tramite giunti reversibili che consentono il passaggio da bicicletta standard (o e-bike) a cargo bike con tre diverse capacità di carico (Figg. 6-9). In questo contesto progettuale la ricerca ha esplorato le implicazioni costruttive, funzionali e operative del veicolo, ipotizzando che l'architettura modulare potesse incidere sia sulle pratiche d'uso sia sulla gestione dei processi produttivi (Rinaldi and Lagrimino, 2026).

I risultati conseguiti hanno confermato la coerenza dell'approccio alla scala del prodotto e hanno aperto una riflessione sulle sue possibili ricadute a livello sistemico: la possibilità di alternare configurazioni diverse non rappresenta soltanto un ampliamento funzionale del veicolo, ma suggerisce nuove opportunità operative da integrare in scenari di mobilità personale e di logistica urbana. Assumendo quindi il veicolo modulare come dato di partenza le attività esplorative e progettuali descritte in questo contributo sono state guidate dalle seguenti domande di ricerca: a) Quali fattori e componenti strutturali ricorrenti caratterizzano i modelli di micromobilità urbana per il trasporto di persone e merci? b) In che modo un veicolo modulare può essere integrato nei modelli esistenti di micromobilità urbana e quali opportunità operative può generare all'interno di tali configurazioni? c) In quale misura la modularità può abilitare configurazioni ibride in grado di integrare la mobilità personale e la logistica urbana all'interno di una piattaforma condivisa?

Alla luce di queste premesse il contributo si propone di esplorare il potenziale della modularità come leva progettuale in grado di mettere in relazione la mobilità personale e la logistica urbana leggera. Il paper si articola in due passaggi principali: il primo, di natura analitico-interpretativa, è finalizzato all'individuazione dei fattori ricorrenti che caratterizzano i modelli di micromobilità urbana e alla definizione di un framework interpretativo; il secondo, di natura esplorativo-progettuale, mette tale framework in relazione con l'architettura riconfigurabile del veicolo modulare assunto come caso di partenza, al fine di elaborare possibili scenari ibridi tra uso personale e attività professionale.

L'interesse scientifico del contributo risiede nel tentativo di connettere la scala del prodotto e quella del sistema, mostrando come un approccio bottom-up, fondato sulla riconfigurabilità del veicolo, possa contribuire a ripensare le relazioni operative tra mobilità personale e logistica di prossimità. L'ipotesi della ricerca è che la riconfigurabilità del mezzo, oltre ad ampliarne la flessibilità d'uso, possa fungere da dispositivo progettuale generativo di nuove configurazioni ibride tra spostamenti quotidiani e servizi urbani, con implicazioni rilevanti sul piano progettuale, organizzativo e sistemico.

Metodologia | Le esperienze maturate nel contesto del progetto MOST hanno da un lato contribuito allo sviluppo del veicolo modulare definendo domande e obiettivi di ricerca, dall'altro lato hanno supportato la collaborazione con partner accademici e industriali (Università di Bergamo, DISA e DIGIP; Università di Firenze, DIEF; Poste Italiane e Pirelli) e altri stakeholder (Dedacciai Strada) che hanno fornito riferimenti empirici, teorici e applicativi utili a inquadrare i temi della micromobilità personale e della logistica urbana, nonché un terreno di verifica progettuale.

La ricerca è stata impostata seguendo l'approccio metodologico del Design Thinking, articolandosi secondo il modello del Double Diamond, in quattro passaggi: Discover, Define, Develop e Deliver (Fig. 10). Il modello combina una prima sequenza di esplorazione e sintesi analitica finalizzata alla definizione del problema e alla costruzione del quadro interpretativo, con una seconda sequenza di esplorazione e sintesi progettuale, orientata allo sviluppo e alla formalizzazione di possibili soluzioni strategiche (Viviani et alii, 2024), integrando così approcci di Research for Design e Research through Design (Archer, 1995; Jonas, 2015).

La prima fase, Discover, è stata dedicata alla raccolta e alla prima organizzazione dei materiali utili a descrivere i principali modelli di micromobilità per il trasporto di persone e merci. La costruzione del corpus analitico non ha seguito una logica di esaustività o di rappresentatività statistica, ma una selezione qualitativa e intenzionale delle fonti (Gerring, 2006), definita in funzione della loro pertinenza alle domande di ricerca. A tal fine, all'interno della letteratura scientifica, sono state selezionate due principali tipologie di contributi (Tab. 1) riguardanti revisioni della letteratura dedicate a temi specifici della micromobilità (n° contributi: 5) e casi studio relativi a modelli di micromobilità teorici o operativi (n° contributi: 10).

Per la prima categoria sono stati privilegiati contributi capaci di: a) sintetizzare lo stato del dibattito sui temi della micromobilità urbana, della mobilità personale, dell'intermodalità, della logistica urbana leggera e delle configurazioni ibride; b) restituire in forma critica le principali configurazioni ricorrenti del settore; c) offrire un quadro utile all'identificazione di pattern e fattori ricorrenti. Per la seconda categoria sono stati invece selezionati casi capaci di: a) rappresentare modelli di micromobilità espliciti e riconoscibili; b) descrivere in modo sufficientemente dettagliato il vettore, il servizio o l'assetto operativo; c) rendere leggibili requisiti d'uso, condizioni di servizio e logiche organizzative utili a una successiva comparazione qualitativa.

La fase successiva, Define, è stata dedicata alla sistematizzazione delle fonti raccolte; le diverse categorie di contributi sono state sottoposte a una lettura comparativa finalizzata a individuare gli elementi utili a descrivere il funzionamento dei diversi modelli di micromobilità. Tali elementi sono stati successivamente organizzati in modo iterativo, in base ad affinità semantiche e funzionali, attraverso attività di mappatura visiva e di raggruppamen-





to condotte sulla piattaforma Miro[2]. Questo processo di astrazione qualitativa ha portato all'individuazione di cinque componenti strutturali ricorrenti (Tab. 2), successivamente assunte come fattori nell'elaborazione di un framework interpretativo.

Sulla base delle suggestioni maturate la fase Develop ha introdotto la dimensione propriamente progettuale della ricerca: fattori strategici e modularità del veicolo sono stati messi in relazione per esplorare possibili riconfigurazioni sistemiche generate dall'interazione tra configurazioni di micromobilità esistenti e le nuove opportunità offerte dalla modularità del mezzo.

Operativamente la fase si è articolata in due momenti principali: 1) una prima attività di generazione e discussione di ipotesi progettuali, finalizzata all'esplorazione di possibili modelli innovativi e/o ibridi, sviluppata attraverso una sessione di Design Sprint (Rinaldi, Busciantella-Ricci and Viviani, 2024; Knapp, Zeratsky and Kowitz, 2022) coordinata dai ricercatori di IDEE Lab dell'Università di Firenze e condotta con il coinvolgimento di giovani designer e designer professionisti (n. 8 partecipanti); 2) una successiva attività di confronto e selezione mediante focus group con partner MOST (n. 5 partecipanti), finalizzata a discutere le ipotesi emerse e a raccogliere valutazioni tecniche preliminari sulla loro fattibilità, utili a orientare la selezione delle proposte ritenute più promettenti in termini di innovatività e fattibilità.

Infine la fase di Deliver si è concentrata sulla formalizzazione degli esiti dell'esplorazione progettuale sotto forma di modelli sistemici e di scenari progettuali. Gli esiti sono stati restituiti mediante mappe concettuali e storyboard, considerati stru-

Figg. 1, 2 | Modular bike project proposal: e-bike layout; e-cargo bike layout, Size 'S' (credits: the Authors, 2025).

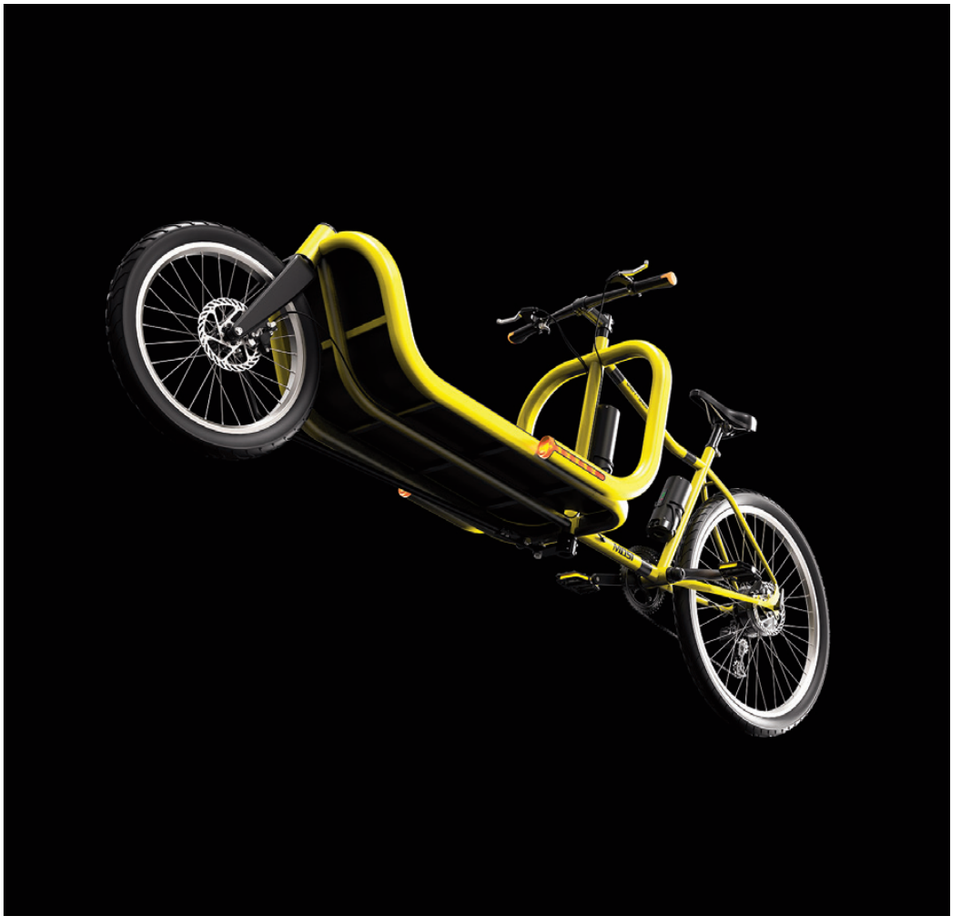
menti distinti ma complementari. Le mappe concettuali sono state utilizzate per sintetizzare il framework interpretativo emerso dalla fase analitica e per formalizzare il modello ibrido di micromobilità elaborato nella fase progettuale.

Gli storyboard sono stati invece sviluppati per rappresentare alcuni possibili scenari d'uso interni al modello proposto, illustrandone in forma sequenziale attori, passaggi operativi, interazioni e flussi di servizio. Tali scenari non rappresentano soluzioni operative validate, ma configurazioni concettuali elaborate come strumenti di indagine progettuale, utili a esplorare le possibili modalità di attivazione del veicolo modulare all'interno del sistema ipotizzato. Gli storyboard sono stati realizzati con il supporto di software di intelligenza artificiale per la generazione di immagini.

Modelli di micromobilità urbana | L'analisi dei modelli esistenti di micromobilità urbana ha evidenziato due domini operativi principali: la mobilità personale e la logistica urbana leggera. Nel dominio della mobilità personale, la micromobilità emerge sotto due prospettive complementari: da un lato, come evidenziato da Abduljabbar, Liyanage and Dia (2021), è interpretata in relazione al potenziale dei veicoli leggeri nell'abilitare nuove opportunità di spostamento, dall'altro, come mostrato da Zhang, Kasraian and van Wesemael (2023), tali opportunità risultano strettamente dipendenti dalle caratteristiche del contesto costruito.

In entrambe le prospettive la micromobilità si configura prevalentemente come un sistema di connessione puntuale tra origine e destinazione, finalizzato sia a garantire continuità di spostamento





Figg. 3, 4 | Modular bike project proposal: e-cargo bike layout, Size 'M'; e-cargo bike layout, Size 'L' (credits: the Authors, 2025).

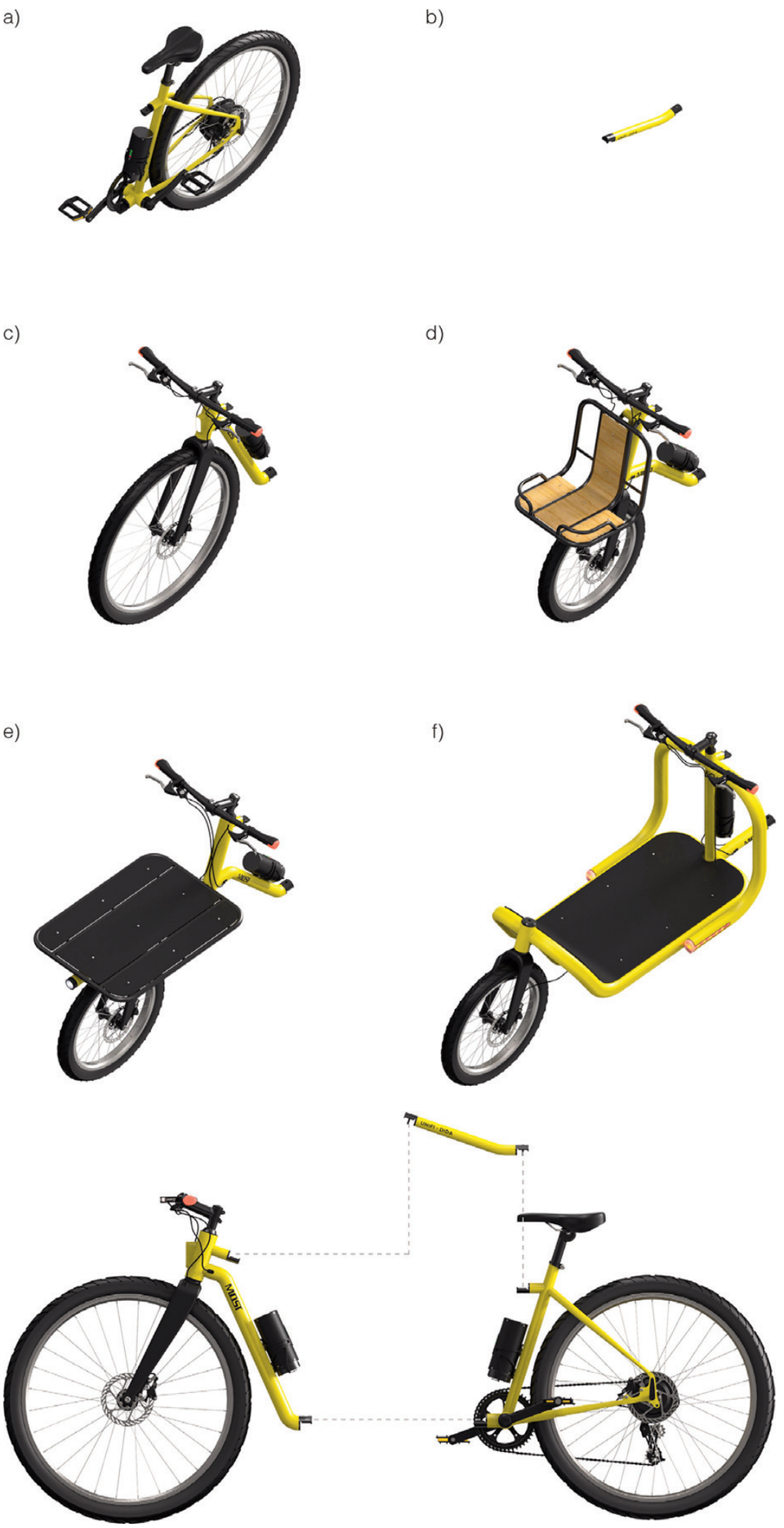


Fig. 5 | Visualisation of the vehicle's six modules: (a) rear module, (b) transversal tube module, (c) front bike module, (d) front cargo 'S' module, (e) front cargo 'M' module, and (f) front cargo 'L' module (credit: the Authors, 2025).

Fig. 6 | E-bike layout: modules and disassembly scheme (credit: the Authors, 2025).

su brevi distanze sia a integrare segmenti di 'primo e ultimo miglio' con infrastrutture di trasporto pubblico o altri nodi strategici (Abduljabbar, Liyanage and Dia, 2021; Arias-Molinares et alii, 2023; Eom, Lee and Lee, 2023).

Nel primo caso i veicoli leggeri vengono impiegati soprattutto per spostamenti individuali relativamente lineari, organizzati attorno alle esigenze dell'utente e alla necessità di collegare ambiti residenziali e servizi di prossimità (Zhang, Kasraian and van Wesemael, 2023). Nel secondo caso la micromobilità assume un ruolo crescente nelle connessioni intermodali lungo percorsi di medio-lungo raggio. Diversi studi evidenziano infatti come essa contribuisca ad ampliare il bacino di accessibilità delle stazioni del trasporto pubblico, migliorando la continuità del sistema di mobilità urbana e favorendo configurazioni di mobilità integrata (Abduljabbar, Liyanage and Dia, 2021; Oeschger, Caulfield and Carroll, 2025). L'integrazione tra veicoli leggeri e il trasporto collettivo consente di estendere l'area di 'influenza' delle stazioni e di ridurre le discontinuità spaziali tra le infrastrutture di mobilità e il tessuto urbano diffuso (Luo, Li and Hampshire, 2021).

In relazione a tali condizioni operative le biciclette e le cargo bike emergono come veicoli particolarmente rilevanti per la micromobilità urbana, grazie alla semplicità costruttiva, alla manovrabilità e ai ridotti requisiti infrastrutturali che ne favoriscono l'impiego in contesti urbani densi e nelle connessioni di prossimità (Pucher and Buehler, 2012). La letteratura mostra come questi mezzi abbiano progressivamente assunto ruoli differenziati all'interno dei modelli di mobilità personale: numerosi studi evidenziano infatti l'efficacia della bicicletta come vettore di raccordo intermodale, in particolare nei sistemi bike-and-ride e, più in generale, nelle configurazioni che integrano la mobilità ciclabile e il trasporto collettivo (Martens, 2007; Oeschger, Caulfield and Carroll, 2025).

In questa stessa direzione si collocano alcune esperienze progettuali sul mezzo personale, come



Fig. 7 | E-cargo bike layout, Size 'S': modules and disassembly scheme (credit: the Authors, 2025).



Fig. 8 | E-cargo bike layout, Size 'M': modules and disassembly scheme (credit: the Authors, 2025).



Fig. 9 | E-cargo bike layout, Size 'L': modules and disassembly scheme (credit: the Authors, 2025).

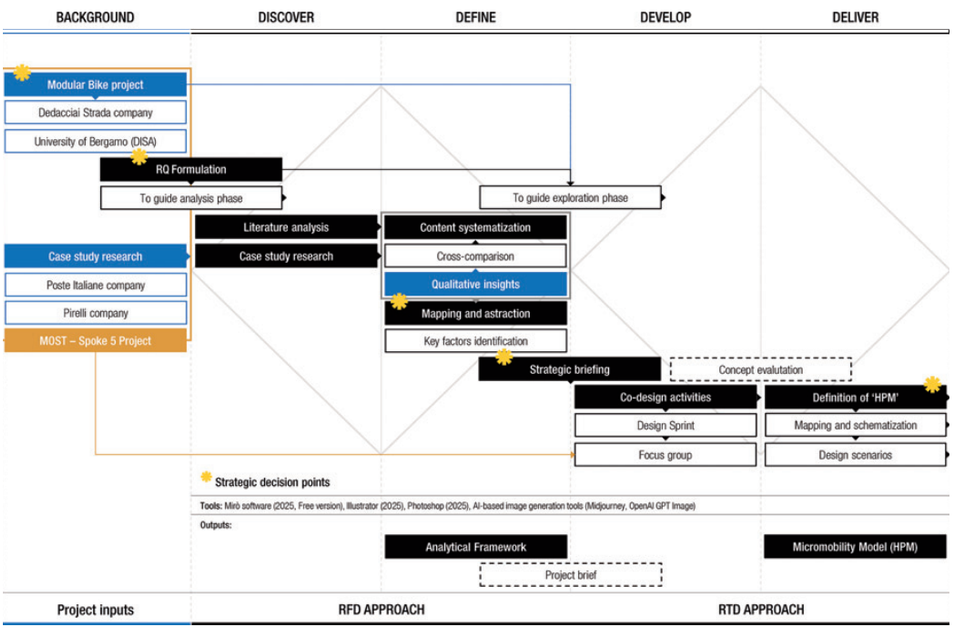


Fig. 10 | Overall workflow diagram based on the Double Diamond design thinking model. The figure illustrates the four main phases of the research process (Discover, Define, Develop, and Deliver), emphasising the relationships among analytical activities, project development, and final outputs. It shows how literature review, factor mapping, and scenario building progressively informed the systemic exploration of modular micromobility solutions (credit: the Authors, 2025).

quella discussa da Tosi et alii (2012), in cui la bicicletta pieghevole, per la sua capacità di compattarsi ed essere facilmente smontata e trasportata, è concepita come dispositivo capace di facilitare ulteriormente l'integrazione fisica e operativa con altri sistemi di trasporto. In aggiunta altre ricerche più recenti mostrano un crescente interesse per la cargo bike anche in ambiti di mobilità privata, familiare e quotidiana, evidenziandone l'elevato potenziale applicativo (Betancur, Lebeau and Macharis, 2024; Carracedo and Mostofi, 2022; Marincek, Rérat and Lurkin, 2024). Nel loro insieme tali sviluppi confermano la flessibilità del vettore ciclabile, ma mostrano anche una progressiva differenziazione in configurazioni specializzate, generalmente ottimizzate per contesti e modalità d'uso specifici.

Diversamente dai modelli di mobilità personale i sistemi di logistica urbana leggera presentano configurazioni operative più articolate, caratterizzate da relazioni multilivello tra infrastrutture, nodi logistici e vettori di distribuzione. In questi sistemi la gestione dei flussi di merci richiede il coordinamento su diverse scale territoriali, dalla distribuzione periurbana fino al punto di consegna finale.

Negli ultimi anni la rapida crescita dell'e-commerce e l'aumento delle consegne B2C (Buyer to Consumer) hanno intensificato la pressione sulle catene logistiche urbane, rendendo la distribuzione di ultimo miglio uno dei segmenti più critici dell'intero sistema distributivo. Tale segmento è infatti associato a costi operativi elevati, congestione del traffico e impatti ambientali significativi, soprattutto nei contesti urbani ad alta densità (Allen et alii, 2018; Mangiaracina et alii, 2019). In risposta a queste criticità la letteratura evidenzia il potenziale delle biciclette e delle cargo bike come strumenti per riorganizzare i modelli di distribuzione urbana delle merci.

In questa direzione sia Bachofner et alii (2022) sia de Oliveira et alii (2017) riconducono i veicoli leggeri a possibili strategie di innovazione e sostenibilità per il 'last mile' urbano, mentre Schomakers et alii (2022) mostrano, attraverso un caso applicativo, come tali logiche possano tradursi in configurazioni cargo innovative adatte a contesti urbani complessi. Tale potenziale non può tuttavia essere letto in modo automatico: sia de Oliveira et alii (2017) sia Mangiaracina et alii (2019) mostrano come l'efficacia di tali soluzioni non dipenda soltanto dalle prestazioni del vettore, ma dalla loro integrazione entro assetti organizzativi e configurazioni di servizio adeguate.

L'adozione di tali veicoli è dunque spesso associata allo sviluppo di infrastrutture di distribuzione decentrata: in particolare, i microhub urbani (Katsela et alii, 2022; Günes et alii, 2024; Oliveira et alii, 2025) e i nanohub (Kania et alii, 2022) stanno emergendo come nodi intermedi di consolidamento in grado di ricevere flussi provenienti da centri logistici primari e redistribuirli verso le destinazioni finali mediante flotte di veicoli leggeri, in particolare cargo bike ed e-cargo bike. Queste configurazioni delineano strutture logistiche multilivello in cui le modalità di trasporto ad alta capacità collegano i centri di distribuzione ai nodi intermedi urbani, mentre i veicoli leggeri gestiscono la distribuzione capillare nel segmento finale della catena logistica. Dal punto di vista organizzativo tali sistemi sono spesso configurati secondo modelli gerarchici, come le architetture 'hub-and-spoke' o 'two-echelon', in cui nodi logistici e vettori operano in modo coordinato per ottimizzare i flussi distributivi e ridurre la presenza di veicoli pesanti nelle aree urbane più dense (Mangiaracina et alii, 2019; Stokkink and Geroliminis, 2025).

Configurazioni ibride | Tra i due domini precedentemente descritti si colloca un insieme crescente di configurazioni ibride in cui mobilità personale e logistica urbana tendono progressivamente a intersecarsi. In questi modelli i sistemi di trasporto di persone e quelli di distribuzione delle merci non operano più come infrastrutture separate immerse nel medesimo tessuto urbano, ma condividono parzialmente risorse, flussi o infrastrutture operative, generando nuove forme di organizzazione della mobilità urbana.

Una prima direzione di sviluppo riguarda i modelli logistici che sfruttano spostamenti personali non dedicati, trasformando i viaggi individuali in capacità logistica opportunistica. Buldeo Rai et alii (2017) inquadrano questo principio nella nozione di 'crowd logistics', evidenziando come i flussi di mobilità quotidiana possano essere parzialmente riconvertiti in capacità distributiva attraverso il coinvolgimento di soggetti non professionali. Simoni et alii (2020) mostrano su un piano più applicativo come tale integrazione possa essere simulata su scala urbana attraverso diversi modelli di 'crowdshipping', nei quali la consegna si innesta su percorsi già esistenti, come quelli effettuati in auto o mediante trasporto pubblico, riducendo la necessità di viaggi dedicati. In questi casi l'ibridazione avviene dunque principalmente a livello dei flussi: ciò che muta è il significato operativo di uno spostamento personale che, in determinate condizioni, assume una funzione logistica temporanea.

Una seconda direzione riguarda invece le forme di integrazione infrastrutturale tra sistemi di mobilità e reti logistiche urbane. Shafiee et alii (2026) descrivono un sistema alternativo di ultimo miglio nel quale 'microhub' e 'crowdshipping' vengono combinati entro una struttura coordinata, facendo del nodo intermedio il punto di connessione tra vettori logistici dedicati e capacità distributiva diffusa. Stokkink e Geroliminis (2025) propongono un modello di ibridazione multimodale ancora più esplicito, in cui i trasporti con automezzi, metro e micromobilità vengono coordinati all'interno di una struttura gerarchica dell'ultimo miglio, in cui il vettore metropolitano funge quasi da 'microhub' in movimento.

In questa medesima direzione si colloca il contributo Oliveira et alii (2025), i quali descrivono una piattaforma MaaS che integra mobilità personale e distribuzione urbana attraverso l'uso combinato di micromobilità condivisa, 'crowdshipping' e una rete di 'microhub'. In questo secondo gruppo di modelli l'ibridazione non si costruisce soltanto attraverso la sovrapposizione dei flussi personali e logistici, ma anche attraverso la combinazione di nodi, reti e vettori differenti all'interno dello stesso assetto di servizio.

Pur non riferendosi sempre a configurazioni specificamente incentrate su biciclette o cargo bike, questi modelli risultano comunque rilevanti, in quan-

to rendono leggibili forme di integrazione tra mobilità personale e logistica urbana, potenzialmente riconducibili anche a logiche di micromobilità. Nel loro insieme essi evidenziano una crescente permeabilità tra i due domini e mostrano come l'ibridazione costituisca già oggi un fattore strategico-organizzativo multilivello. In questa prospettiva l'ipotesi di un vettore modulare suggerisce una direzione progettuale ulteriore, potenzialmente in grado di rafforzare tali forme di ibridazione e di estenderle attraverso le molteplici pratiche d'uso del mezzo.

Sintesi e mappatura dei fattori strategici | L'analisi comparata dei modelli di micromobilità emersi dalla letteratura e dai casi di studio ha evidenziato la ricorrenza di alcune componenti strutturali che ne definiscono l'architettura funzionale: a) nodi operativi, b) strutture relazionali di rete, c) vettori di mobilità, d) attori operativi; e) logiche di coordinamento dei flussi. Nel loro insieme questi cinque elementi descrivono le principali dimensioni attraverso cui i sistemi di micromobilità urbana prendono forma e costituiscono un quadro interpretativo utile per analizzare le differenti configurazioni di trasporto (Fig. 11).

I nodi operativi rappresentano i punti di origine, di consolidamento o di destinazione dei flussi all'interno dei sistemi di micromobilità urbana; nel caso della mobilità personale essi coincidono prevalentemente con luoghi di partenza e arrivo degli spostamenti o con nodi di interscambio (stazioni, parcheggi, ecc.). Nei sistemi logistici urbani assumono invece la forma di centri di distribuzione principali, nodi di decentramento (microhub, nanohub, ecc.) o punti di consegna diffusi nello spazio urbano. Le strutture relazionali di rete descrivono il modo in cui i nodi sono connessi, definendo la configurazione complessiva di un sistema, nonché il principio gerarchico e il supporto infrastrutturale che ne consentono il funzionamento (reti ciclabili, rete stradale, ecc.). A seconda del contesto operativo la rete può assumere forme distribuite, tipiche degli spostamenti personali peer-to-peer, oppure configurazioni multilivello come nei modelli 'hub-and-spoke' e 'two-echelon' propri della logistica urbana, ma riscontrabili anche nel dominio del trasporto personale intermodale.

Se nodi e strutture definiscono lo spazio operativo del sistema, i vettori di mobilità rappresentano i mezzi attraverso cui persone o merci si muovono al suo interno. Nel contesto della micromobilità i veicoli leggeri svolgono un ruolo centrale nel garantire connessioni capillari su scala urbana, operando sia come mezzi autonomi per spostamenti diretti sia come componenti integrative di sistemi multimodali, in interazione con veicoli tradizionali (auto, furgoni, truck, ecc.) e con soluzioni di trasporto collettivo (autobus, metro, treno, ecc.). Gli attori operativi corrispondono invece ai soggetti che utilizzano, gestiscono o coordinano tali vettori all'interno dello spazio urbano: utenti, operatori logistici, piattaforme digitali, corrieri indipendenti o gestori di servizi condivisi. In questo senso, vettori e attori costituiscono la componente dinamica del sistema, poiché rendono effettiva l'attivazione delle relazioni tra i nodi e l'operatività della rete.

Le logiche di coordinamento descrivono infine il modo in cui le relazioni tra nodi, vettori e attori vengono rese operative nel tempo; esse comprendono modelli di servizio, protocolli organizzativi e dispositivi tecnologici che regolano l'accesso, l'assegnazione e la gestione dei flussi, come nei sistemi di condivisione, nelle piattaforme di consegna su richiesta o nei servizi postali e logistici strutturati. In questo senso il coordinamento non riguarda soltanto la distribuzione spaziale dei movimenti, ma anche le modalità con cui il sistema organizza l'interazione tra soggetti, mezzi e funzioni.

Un modello ibrido abilitato dalla modularità | La messa in relazione tra i fattori strategici emersi dall'analisi e le caratteristiche del veicolo modulare sviluppato nell'ambito del progetto MOST-Spoke 5 ha consentito di esplorare il potenziale della modularità secondo differenti livelli di integrazione. A una prima scala il veicolo aveva infatti già mostrato la possibilità di ampliare il potenziale d'uso all'interno di modelli di micromobilità già esistenti, introducendo vantaggi incrementali legati alla smontabilità, alla maggiore adattabilità nei contesti intermodali, alle esigenze di stoccaggio e alla multifunzionalità (Rinaldi and Lagrimino, 2026).

L'esplorazione progettuale a scala sistemica ha invece evidenziato la possibilità di un salto di prospettiva, nel quale la modularità non si limita a migliorare l'adattabilità del veicolo entro modelli consolidati, ma diventa la condizione per definire una configurazione ibrida inedita tra mobilità personale e attività professionale. In questa direzione è stato elaborato un modello di 'Hybrid Professional Micromobility (HPM)', che consente di integrare gli spostamenti individuali con attività di distribuzione urbana o di servizio. L'elemento distintivo del modello risiede nel fatto che l'ibridazione non avviene soltanto a livello dei flussi, ma direttamente a livello del vettore. Il veicolo non viene quindi interpretato soltanto come un artefatto tecnico, ma come un dispositivo progettuale capace di abilitare nuove configurazioni operative all'interno dei sistemi di micromobilità urbana.

Tale passaggio risponde a una criticità ricorrente nei modelli convenzionali di mobilità leggera personale e logistica, nei quali la distinzione tra i mezzi impiegati rimane generalmente netta: un veicolo viene progettato e utilizzato per uno specifico ambito d'uso, mentre le eventuali forme di integrazione riguardano soprattutto la condivisione dei flussi o il coordinamento tra infrastrutture diverse. Nel modello qui proposto invece il vettore cessa di essere monofunzionale e diventa una piattaforma adattiva capace di assumere ruoli differenti nel corso della stessa giornata operativa grazie alle sue proprietà.

In termini generali il modello proposto può essere descritto come una sequenza articolata in tre momenti. Il primo riguarda la mobilità personale di accesso, in cui l'utente utilizza il veicolo modulare, nella sua configurazione a bicicletta o e-bike, per gli spostamenti quotidiani tra casa e il luogo di lavoro o tra diversi punti della città. Il secondo coincide con la riconfigurazione del veicolo presso un nodo operativo, come un hub logistico, una sede di servizio o un punto di appoggio urbano, in cui il mezzo viene adattato alla funzione professionale mediante la sostituzione del modulo anteriore e, se necessario, l'attivazione della componente elettrica. Il terzo riguarda infine la fase di mobilità professionale, in cui il veicolo riconfigurato viene impiegato per attività di distribuzione urbana, consegna di merci leggere o servizi di prossimità. La possibilità di compiere il percorso inverso al termine della giornata rende il sistema reversibile e potenzialmente circolare (Fig. 12).

A questa sequenza operativa corrisponde una serie di vantaggi che ridefiniscono il rapporto tra utente, veicolo, servizio e organizzazione del lavoro. In primo luogo il modello consente di superare la separazione convenzionale tra mezzo personale e mezzo professionale, introducendo una continuità d'uso tra spostamenti quotidiani e attività lavorative: uno stesso veicolo può essere così inserito in sequenze operative differenti nel corso della giornata. In questa prospettiva la modularità non incide soltanto sull'uso del mezzo, ma apre alla possibilità di ripensare anche le logiche di accesso, disponibilità e gestione del veicolo, spostando l'attenzione dalla proprietà del bene alla sua capacità di essere temporaneamente riconfigurato e integrato in sistemi di servizio differenti.

Un secondo vantaggio consiste nella possibilità di adattare la configurazione del veicolo alle effettive condizioni di servizio. La disponibilità di moduli cargo differenti per capacità e ingombro consente infatti di calibrare il mezzo in funzione del volume della merce, della natura del carico, delle caratteristiche del percorso o della frequenza di rientro al nodo logistico. Questo aspetto risulta particolarmente rilevante sia sul piano della pianificazione logistica sia su quello dell'esperienza d'uso dell'utente: trattandosi di veicoli a pedalata assistita, la distribuzione del peso, la compattezza del telaio e l'ingombro complessivo incidono in modo significativo sulla manovrabilità, sulla guidabilità e sull'efficienza operativa.

Un terzo vantaggio riguarda la gestione della flotta e dei processi di manutenzione. Nei sistemi tradizionali l'aumento dei volumi operativi o il mutamento delle esigenze di servizio comporta spesso la necessità di acquisire nuovi mezzi completi, con costi particolarmente elevati nel caso dei veicoli leggeri a pedalata assistita. In una logica modulare l'adeguamento della flotta può invece avvenire anche attraverso la sostituzione, l'integrazione o l'aggiornamento dei soli moduli funzionali, mantenendo invariata la piattaforma di base del veicolo e riutilizzando parte dei componenti esistenti. Ciò consente una gestione più progressiva e adattiva della flotta, riducendo la rigidità degli investimenti e introducendo maggiori margini di flessibilità sia nella manutenzione sia nell'evoluzione del sistema di mezzi.

Le molteplici potenziali implicazioni del modello HPM possono essere rese più evidenti attraverso due scenari esemplificativi, che mostrano come la modularità del vettore possa operare sia all'interno di sistemi logistici già strutturati sia in configurazioni più avanzate di condivisione temporanea del mezzo. Un primo scenario riguarda i servizi di consegna merci dell'ultimo miglio organizzati attraverso microhub urbani. In questo caso il veicolo modulare garantisce continuità d'uso, l'adattamento del mezzo alla missione e una maggiore flessibilità nella gestione della flotta. Il lavoratore può raggiungere il nodo logistico in configurazione bike, riconfigurare il mezzo in base al carico e al percorso di consegna e utilizzare il modulo più adatto in funzione del volume della merce, della frequenza di rientro all'hub o delle condizioni del tragitto. In questa configurazione la modularità non migliora soltanto le prestazioni del singolo mezzo, ma rende più adattabile l'organizzazione complessiva del servizio (Fig. 13).

Un secondo scenario, di carattere più prospettico, riguarda forme temporanee di integrazione tra

l'uso personale e il servizio logistico. In questa ipotesi il veicolo personale dell'utente, anziché essere semplicemente parcheggiato presso un nodo di interscambio o un microhub, può essere temporaneamente assorbito in un circuito di servizio, riconfigurato per attività logistiche leggere e successivamente restituito alla sua funzione originaria. Una simile configurazione introduce una relazione diversa tra utente, infrastruttura e servizio, aprendo nuove questioni relative alle forme di accesso, proprietà, manutenzione e disponibilità del veicolo. In questo senso la modularità non agisce soltanto come soluzione tecnica, ma anche come leva per immaginare modelli d'uso condiviso più flessibili e reversibili (Fig. 14).

Limiti dello studio, barriere e trasferibilità | Il modello HPM elaborato costituisce una configurazione concettuale sviluppata attraverso un approccio di Research through Design e non una soluzione già validata sul campo. Il contributo ha consentito di argomentare con sufficiente coerenza la plausibilità progettuale e sistemica del modello, ma non di verificarne ancora empiricamente l'efficacia operativa, la sostenibilità organizzativa ed economica e la tenuta in contesti reali. Le relazioni tra architettura del veicolo, organizzazione del servizio e pratiche d'uso richiedono pertanto ulteriori approfondimenti attraverso sperimentazioni applicative, analisi comparative e valutazioni di impatto.

Oltre ai limiti connessi alla mancanza di validazione empirica l'implementazione del modello incontra anche alcune barriere di natura normativa, organizzativa ed economica. Tra queste rientrano: sul piano del prodotto questioni relative alla regolamentazione, alla responsabilità d'uso, all'omologazione, alla sicurezza, all'assicurazione del mezzo modulare, nonché alla definizione dei regimi di proprietà e manutenzione in contesti di uso condiviso; sul piano sistemico emergono invece criticità legate alla necessità di infrastrutture e nodi operativi dedicati, con relative implicazioni in termini di spazio urbano, gestione operativa e sostenibilità del servizio. A tali aspetti si aggiungono possibili criticità legate all'accettazione sociale del modello e alla sua effettiva sostenibilità economica nel medio periodo.

La trasferibilità del modello appare plausibile soprattutto in contesti urbani densi, dotati di reti di prossimità, infrastrutture ciclabili, sistemi logistici decentrati o condizioni favorevoli all'intermodalità. Essa risulta invece più problematica in contesti dispersi, fortemente autocentrici o privi di nodi intermedi e di servizi di supporto, quindi il modello non può essere considerato universalmente applicabile, ma come configurazione adattabile, la cui efficacia dipende da specifiche condizioni insediative, infrastrutturali e organizzative.

SDGs, sinergie e compromessi | In relazione agli Obiettivi di Sviluppo Sostenibile (SDG) il contributo

References	Source Type		Description	Mobility / micromobility domain		
	Literature review	Case study		Personal mobility	Logistics	Hybrid
Abduljabbar, Liyanage and Dia (2021)	✓		Systematic literature review outlining the main dimensions of urban micromobility through the lenses of benefits, policy, technology, and use	✓		
Allen et alii (2018)		✓	Urban case study on London analysing the impact of e-commerce growth on last-mile delivery and its implications for light urban freight vehicles		✓	
Buldeo Rai et alii (2017)	✓		Literature review defining crowd logistics and discussing its potential as a hybrid model linking everyday mobility and freight distribution flows			✓
de Oliveira et alii (2017)	✓		Systematic literature review on sustainable vehicle alternatives for freight logistics, focusing on vehicle types, benefits, and implementation barriers		✓	
Eom, Lee and Lee (2023)		✓	Empirical case study in the Seoul / Gyeonggi metropolitan area analysing user preferences for station-based last-mile trips using shared vehicles	✓		
Güneş et alii (2024)		✓	Pilot case study in Seattle evaluating a neighbourhood microhub for last-mile deliveries with e-cargo trikes		✓	
Kania et alii (2022)		✓	Case study on Magdeburg proposing and assessing nano-hubs as a distributed alternative to microhubs for cycle-based urban last-mile freight logistics		✓	
Mangiaracina et alii (2019)	✓		Literature review on solutions for improving B2C e-commerce last-mile delivery efficiency, focusing on service and organisational variables		✓	
Marincek, Rérat and Lurkin (2024)		✓	Empirical case study on cargo-bike users in Switzerland examining motivations, barriers, and user profiles related to personal mobility	✓		
Martens (2007)		✓	Case study on Dutch bike-and-ride policies, showing how bicycles can act as intermodal access and egress vectors within public transport systems	✓		
Oliveira et alii (2025)		✓	Case study on Joinville proposing an integrated MaaS platform for passenger and freight transport via microhubs, crowdshipping and shared vehicles			✓
Shafiee et alii (2026)		✓	Scenario-based study on an alternative last-mile delivery system combining microhubs and crowdshipping as a hybrid configuration			✓
Simoni et alii (2020)		✓	Simulation-based urban case study on Rome evaluating different crowdshipping models and their impacts on traffic and last-mile operations			✓
Stokkink and Geroliminis (2025)		✓	Applied case study on Madrid identifying optimal microhub locations in a multimodal system coordinated across trucks, metro systems, and micromobility			✓
Zhang, Kasraian and van Wesemael (2023)	✓		Systematic literature review on the relationship between built environment and micromobility, focusing on nodes, links, networks, and use	✓		

Tab. 1 | Selected literature and case studies analysed in relation to source type, content focus, and main micromobility domains (credit: the Authors, 2025).

evidenzia ricadute potenziali soprattutto rispetto agli SDG 9, 11, 12 e 13. I benefici più immediati riguardano l'SDG 9 (Industria, innovazione e infrastrutture), nella misura in cui la modularità applicata a biciclette e cargo bike introduce possibilità di innovazione non solo sul piano del prodotto, ma anche su quello dell'organizzazione tecnica e gestionale delle flotte: la riconfigurabilità del veicolo consente infatti di adattare il mezzo a usi differenziati, di ridurre la rigidità dei mezzi monofunzionali e di immaginare logiche di aggiornamento e manutenzione progressive basate sulla sostituzione di componenti e moduli anziché del veicolo nella sua interezza.

Ad essa si affiancano ricadute potenziali sul piano urbano e ambientale. In rapporto all'SDG 11 (Città e comunità sostenibili) il modello suggerisce infatti la possibilità di integrare in modo più stretto mobilità personale, servizi di prossimità e reti di distribuzione leggere, contribuendo alla costruzione di assetti di mobilità più flessibili, capillari e compatibili con contesti ad alta densità o con tessuti urbani sensibili. In relazione all'SDG 13 (Azione per il clima) tali configurazioni possono invece tradursi, almeno in via indiretta, in una riduzione dell'impatto ambientale di alcuni segmenti della mobilità e della logistica urbana, attraverso il maggiore impiego di veicoli leggeri a basse emissioni e la possibile sostituzione di mezzi più ingombranti e impattanti in specifici segmenti di ultimo miglio.

In questo quadro l'SDG 12 (Consumo e produzione responsabile) assume un ruolo trasversale, poiché il modello proposto intercetta il tema dell'uso responsabile delle risorse lungo l'intero ciclo di vita del prodotto che va dalla produzione del veicolo alla sua gestione d'uso, fino alla configurazione sistemica dei servizi di mobilità e logistica. Infatti la modularità non incide soltanto sulle modalità di progettazione e aggiornamento del mezzo, ma suggerisce anche forme potenzialmente più razionali di impiego dei veicoli, di organizzazione delle funzioni e di distribuzione delle risorse materiali, energetiche e operative, riducendo la rigidità tra mezzi, usi e servizi. Tali ricadute non devono tuttavia essere assunte automaticamente né in modo lineare. Il modello HPM apre infatti anche a possibili compromessi e criticità, relativi sia alla sostenibilità dei servizi proposti sia alle condizioni materiali e organizzative della loro gestione; a ciò si aggiunge il rischio di effetti indiretti non necessariamente coerenti con i benefici attesi dal modello. In questo senso le sinergie tra gli SDG 9, 11, 12 e 13 appaiono plausibili, ma dipendono da condizioni di implementazione, regolazione e gestione che il contributo, per la sua natura esplorativa, non consente ancora di verificare empiricamente.

Conclusioni | La ricerca ha esplorato il potenziale della modularità come leva progettuale capace di mettere in relazione la mobilità personale e la logistica urbana leggera, prendendo come punto di

References	Strategic factors				
	Operational nodes	**Network structure**	**Mobility vectors**	**Operational actors**	**Coordination logics**
Abduljabbar, Liyanage and Dia (2021)	first / last-mile access nodes	multimodal networks, first / last-mile links	light vehicles for short trips	users, operators and regulators	policy, governance and service logics
Allen et alii (2018)	depots, lockers and delivery nodes	distributed and congested last-mile network	light urban freight vehicles and alternative delivery vectors	carriers, customers and city actors	routing, delivery windows and service coordination
Buldeo Rai et alii (2017)	pick-up points, delivery points, and service locations	people-freight flows, detour-based links	cars, bikes, and public transport	receivers, platforms, providers, and crowd participants	matching, incentives, trust, and task management
de Oliveira et alii (2017)	consolidation centres, deconsolidation nodes	multilevel last-mile delivery structure	bicycles, tricycles, motorcycles, and EVs	operators, customers, and urban authorities	restrictions, charging, consolidation, and vehicle mix
Eom, Lee and Lee (2023)	metro stations as interchange nodes	metro access links, first / last-mile structure	walking, shared bikes, e-scooters	users by age, income, and household profile	transit integration, access, fares, and MaaS
Güneş et alii (2024)	microhub, storage, charging, and transfer points	multilevel depot-to-last-mile structure	cargo vans, e-cargo tricycles	operators, researchers, authorities, and stakeholders	routing, replenishment, collaboration, and scaling
Kania et alii (2022)	microhubs, nano-hubs, transfer points	multimodal and multilevel delivery structure	diesel vans, cargo bikes, swap bodies	providers, experts, authorities, and residents	transhipment, restocking, and node location
Mangiaracina et alii (2019)	parcel lockers, alternative delivery points	B2C delivery network configuration	limited focus on delivery vectors	customers, operators, delivery actors	failed deliveries, pricing, and automation
Marincek, Rérat and Lurkin (2024)	parking, bike storage, rental points	cycling infrastructure and street conditions	cargo bikes, e-cargo bikes, sharing, and ownership	owners, families, sharing operators, and multimodal users	access, booking, sharing, and parking conditions
Martens (2007)	stations, bus stops, bike parking, lockers	cycling-transit access and egress structure	bicycles, trains, buses, trams, and metro	public transport users and institutional actors	parking, rental systems, and policy measures
Oliveira et alii (2025)	parking zones, bus stops, microhubs, DCs	integrated passenger-freight service network	e-bikes, e-scooters, EVs, and public transport	MaaS users, public transport users, crowdshippers, and carriers	delivery assignment, shared use, and payment
Shafiee et alii (2026)	microhubs as transfer and consolidation nodes	two-echelon delivery structure, service zones	trucks and bicycles	operators, crowdshippers, senders, and receivers	synchronisation, inventory, and split loads
Simoni et alii (2020)	pick-up stations, depots, transit stops	urban crowdshipping and transit network	delivery trucks, cars, and public transport	carriers, crowdshippers, customers, and authorities	matching, detours, parking, and tour organisation
Stokkink and Geroliminis (2025)	microhubs, warehouses, metro depots, and stops	three-stage multimodal delivery structure	trucks, metro systems, micromobility, and cargo bikes	operators and dedicated drivers	allocation, hub location, and cross-stage coordination
Zhang, Kasraian and van Wesemael (2023)	docking stations, parking areas, pick-up points	node-link-network spatial structure	shared bikes, e-bikes, and e-scooters	users, operators, and public authorities	policy and design recommendations

Legend: ☐ low, ☐ medium, ☐ high relevance

Tab. 2 | Comparative mapping of the five strategic factors emerging from the selected references (credit: the Authors, 2025).

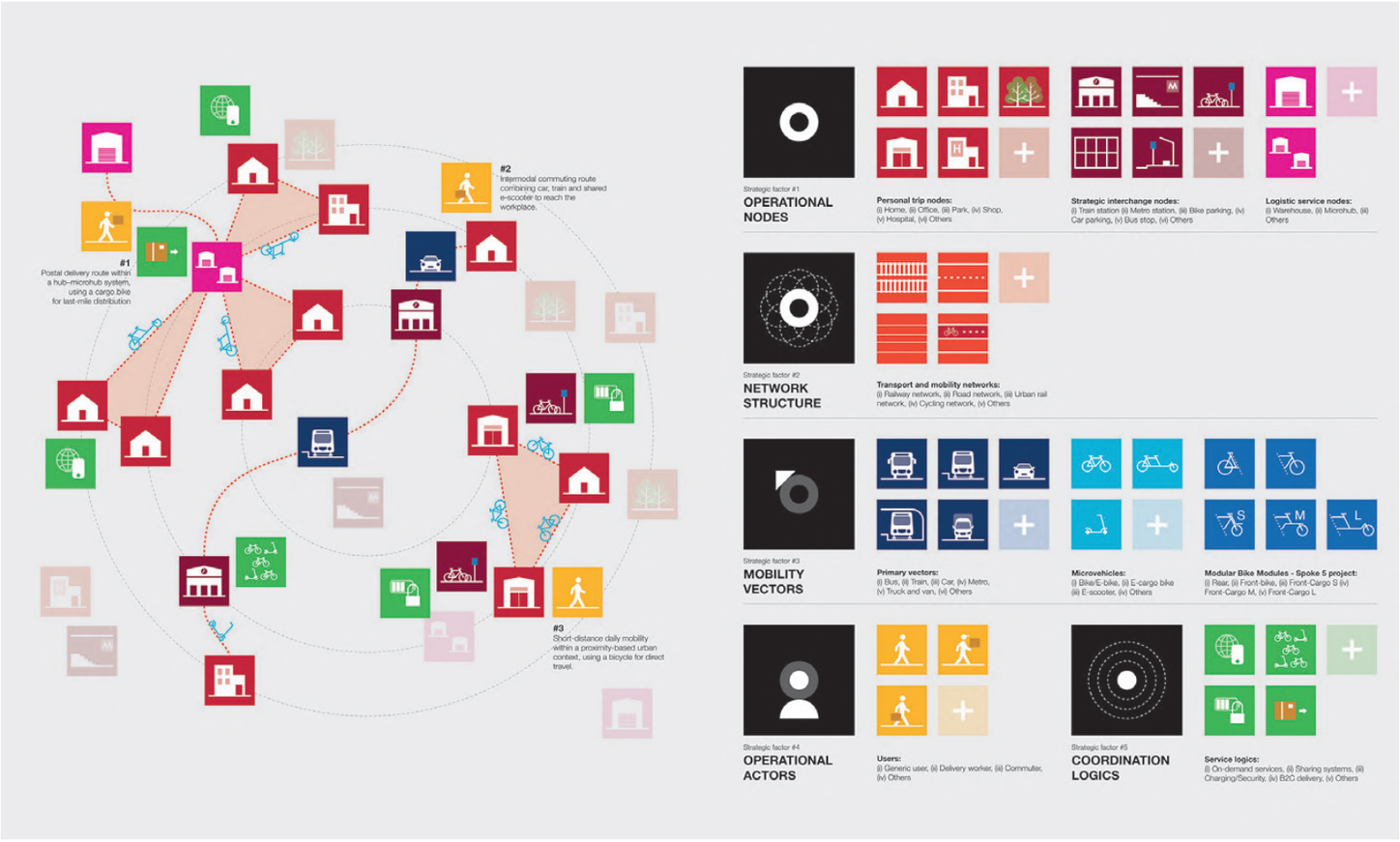


Fig. 11 | Strategic factors and a schematic visualisation of urban micromobility models. The figure presents, on the right, the set of recurring strategic factors identified through the comparative analysis – operational nodes, network structure, mobility vectors, operational actors, and coordination logics – and, on the left, a schematic visualisation that systematises these factors into simplified urban micromobility models. The diagram offers an initial synthetic representation of how these factors can be combined to interpret personal mobility, light urban logistics, and hybrid configurations within an urban system (credit: the Authors, 2025).

partenza un veicolo riconfigurabile sviluppato nell'ambito del progetto MOST-Spoke 5. In coerenza con gli orientamenti più recenti della letteratura, che interpretano la micromobilità non soltanto come insieme di vettori leggeri, ma come sistema composto da infrastrutture, servizi, attori e logiche organizzative, i risultati mostrano come la modularità possa estendere i propri effetti dalla scala del prodotto a quella del sistema. In questa prospettiva il principale contributo dello studio consiste nell'aver messo in relazione la riconfigurabilità del mezzo con l'architettura dei modelli di micromobilità urbana, mostrando il potenziale della modularità come leva per l'implementazione e l'ibridazione della mobilità personale e della logistica di prossimità.

Nel loro insieme gli esiti descritti consentono di formulare una risposta articolata alle tre domande di ricerca poste in apertura del contributo, evidenziando tre risultati principali: 1) l'individuazione di fattori strutturali ricorrenti nei modelli di micromobilità urbana per il trasporto di persone e merci; 2) il riconoscimento del potenziale della modularità nel generare vantaggi operativi e funzionali nelle diverse fasi d'uso del veicolo; 3) la possibilità che tali proprietà concorrano ad abilitare configurazioni ibride di servizio tra mobilità personale e logistica urbana.

A partire da tali esiti il primo risultato consiste nella costruzione di un quadro interpretativo fondato su cinque fattori ricorrenti, che consente di leggere in modo trasversale configurazioni differenti di micromobilità urbana. In questo senso esso non assume soltanto una funzione descrittiva, ma si configura anche come strumento analitico e operativo, utile sia per confrontare modelli esistenti sia per orientare successive esplorazioni progettuali relative agli assetti sistemici della mobilità urbana (Fig. 11).

Il secondo risultato riguarda il modello 'Hybrid Professional Micromobility' (HPM), attraverso il quale sul piano progettuale viene esplorato il ruolo della modularità nell'integrazione tra mobilità personale e logistica urbana. Il modello consente infatti di ipotizzare una configurazione ibrida di servizio in cui lo stesso veicolo, all'interno di una piattaforma condivisa e reversibile, può assumere funzioni differenti in relazione alle diverse fasi d'uso. Con questo assetto diventano leggibili anche i vantaggi più direttamente riferibili all'operatività del mezzo: nella mobilità personale una maggiore adattabilità e flessibilità d'impiego; nella fase logistica, una migliore calibrazione rispetto al carico, alla missione operativa e ai vincoli di percorso, con ricadute anche sullo stoccaggio, sulla manutenzione e sulla gestione della flotta (Figg. 12-14).

Contemporary urban mobility is required to address complex environmental, social, and economic challenges that demand the adoption of innovative, sustainable, intelligent, flexible, and inclusive paradigms (Bruno et alii, 2024; European Commission, 2019). Within this context, micromobility represents a strategic component of urban transport systems (Abduljabbar, Liyanage and Dia, 2021): light vehicles, including bicycles and cargo bikes, constitute low-energy and low-emission solutions, particularly effective at the local scale, in contexts characterised by infrastructural constraints, functional proximity, and high density (Arias-Molinares et alii, 2023; Buehler and Pucher, 2021; Eom, Lee and Lee, 2023). Precisely because of these properties, the effects of micromobility are not only measurable in environmental terms, but also in social and economic ones: it contributes to reducing dependence on traditional motorised vehicles, making urban services more accessible and distribution models more efficient, and promoting healthier forms of active mobility (Abduljabbar, Liyanage and Dia, 2021; Martens, 2007; Van Cauwenberg et alii, 2019).

The debate on urban micromobility has developed predominantly from a systemic perspective, focusing on infrastructure planning, service models, regulation, and the construction of integrated mobility ecosystems. From this viewpoint, micromobility is interpreted as a collective and interconnected system in which infrastructures, services, and technologies contribute to defining multimodal and adaptive configurations (Canessa and Centanaro, 2024; Fabbri, 2023; Luo, Li and Hampshire, 2021; Sommariva and Canessa, 2024). Alongside this perspective, however, it is also necessary

to consider the scale of the product, understood as an enabling design level in which technical and technological solutions can act as bottom-up levers capable of influencing urban mobility models (La Regina et alii, 2025; Schomakers et alii, 2022). It is in this direction that the research developed within the National Centre for Sustainable Mobility[1] (Spoke 5 – Light Vehicle and Active Mobility; Work Package 2.1 – Vehicle Design, Materials and LCA) is positioned, focusing on the design and prototyping of bicycles and cargo bikes and on the exploration of modularity as a strategic lever for innovation (Rinaldi and Lagrimino, 2026).

In the cycling sector, the modular principle finds a particularly mature field of application: a large proportion of bicycle components is governed by international technical standards that have been consolidated over decades, making this domain one of the longest-standing examples of modular interoperability in product design (Galvin and Morkel, 2001). This tradition of standardisation and composability suggests a clear extension in scale: if modularity structures the vehicle's technical architecture, it also serves as a strategic lever to influence production, distribution, and usage configurations. In this direction, the reflection by Pietroni, Di Stefano and Galloppo (2023) highlights the transition from a logic of making to unmake to one of making to remake, according to which modularity assumes a dual value: on the one hand, a technical-design device for developing flexible and configurable products; on the other, an organisational model capable of influencing industrial processes, supply chains, and business models.

This dual nature can also be interpreted through the theoretical model proposed by Carliss Y. Baldwin and Kim B. Clark (1994), which distinguishes three interconnected levels of modularity: Modularity in Design (MiD), Modularity in Production (MiP), and Modularity in Use (MiU). From this perspective, modularity is not limited to the technical decomposition of an artefact (MiD), but is configured as a design principle that relates the product's structure to the organisation of production (MiP) and usage practices (MiU). In other words, as also observed by Tamborrini and Cretaio (2023), the module acquires meaning not as an isolated element, but through the relationships it establishes within a broader, adaptive system, thus extending modularity from the scale of the artefact to that of the system.

These assumptions have been applied in the development of a 4-in-1 light vehicle (Figg. 1-4) conceived within the MOST-Spoke 5 project. The vehicle was designed as a reconfigurable system based on independent structural modules (Fig. 5), connected through reversible joints that allow the transition from a standard bicycle (or e-bike) to a cargo bike with three different load capacities (Figg. 6-9). Within this design context, the research explored the constructive, functional, and operational implications of the vehicle, hypothesising that its modular architecture could influence both usage practices and the management of production processes (Rinaldi and Lagrimino, 2026).

The results obtained confirm the coherence of the approach at the product scale and open up a reflection on its possible implications at the systemic level. The possibility of alternating between different configurations does not merely represent a functional extension of the vehicle, but suggests new operational opportunities to be integrated into scenarios of personal mobility and urban logistics. Taking the modular vehicle as a starting point, the exploratory and design activities described in this contribution were therefore guided by the following research questions: a) What recurring factors and structural components characterise urban micromobility models for the transport of people and goods? b) How can a modular vehicle be integrated into existing models of urban micromobility, and what operational opportunities can it generate within such configurations? c) To what extent can modularity enable hybrid configurations capable of integrating personal mobility and urban logistics within a shared platform?

In light of these premises, the contribution aims to explore the potential of modularity as a design lever capable of linking personal mobility and light urban logistics. The paper is structured in two main stages: the first, analytical and interpretative in nature, is aimed at identifying the recurring factors that characterise urban micromobility models and defining an interpretative framework; the second, exploratory and design-oriented, relates this framework to the reconfigurable architecture of the modular vehicle taken as the starting case, in order to develop possible hybrid scenarios between personal use and professional activity.

The scientific relevance of the contribution lies in connecting the scale of the product to that of the system, showing how a bottom-up approach, based on the vehicle's reconfigurability, can contribute to rethinking the operational relationships between personal mobility and proximity logistics. The research hypothesis is that the vehicle's reconfigurability, in addition to expanding its flexibility of use, may serve as a generative design device for new hybrid configurations between everyday mobility and urban services, with significant implications at the design, organisational, and systemic levels.

Methodology | The experiences developed within the context of the MOST project contributed, on the one hand, to the development of the modular vehicle by defining research questions and objectives, and, on the other, supported collaboration with academic and industrial partners (University of Bergamo, DISA and DIGIP; University of Florence, DIEF; Poste Italiane and Pirelli), as well as other stakeholders (Dedacciai Strada), who provided empirical, theoretical, and applied references useful for framing the themes of personal micromobility and urban logistics, as well as offering a testing ground for design validation.

The research was structured according to a Design Thinking approach, articulated through the Double Diamond model in four stages: Discover, Define, Develop, and Deliver (Fig. 10). The model combines an initial sequence of exploration and analytical synthesis aimed at defining the problem and constructing the interpretative framework, with a second sequence of exploration and design synthesis oriented towards the development and formalisation of possible strategic solutions (Viviani et alii, 2024), thus integrating approaches of Research for Design and Research through Design (Archer, 1995; Jonas, 2015). The first phase, Discover, was dedicated to collecting and organising initial materials to describe the main micromobility models for passenger and freight transport. The construction of the analytical corpus did not follow a logic of exhaustiveness or statistical representativeness, but rather a qualitative, purposive selection of sources (Gerring, 2006), defined by their relevance to the research questions. To this end, two main types of contribution were selected from the scientific literature (Tab. 1): literature reviews addressing specific themes of micromobility (number of contributions: 5), and case studies relating to theoretical or operational micromobility models (number of contributions: 10).

For the first category, contributions were prioritised that were capable of: a) synthesising the state of the debate on urban micromobility, personal mobility, intermodality, light urban logistics, and hybrid configurations; b) critically presenting the main recurring configurations within the sector; c) providing a framework useful for identifying patterns and recurring factors. For the second category, case studies were selected that were capable of: a) representing explicit and recognisable micromobility models; b) describing, in sufficient detail, the vehicle, service, or operational configuration; c) making visible the usage requirements, service conditions, and organisational logics useful for subsequent qualitative comparison.

The subsequent phase, Define, was dedicated to systematising the collected sources. The different categories of contributions were subjected to a comparative reading aimed at identifying the elements useful for describing the functioning of the various micromobility models. These elements were subsequently organised iteratively, according to semantic and functional affinities, through visual mapping and clustering activities carried out on the Miro platform[2]. This process of qualitative abstraction led to the identification of five recurring structural components (Tab. 2), which were subsequently adopted as factors in the development of an interpretative framework.

Building on the insights that emerged, the Develop phase introduced the specifically design-oriented dimension of the research: strategic factors and vehicle modularity were brought into relation to explore possible systemic reconfigurations generated by the interaction between existing micromobility configurations and the new opportunities offered by the vehicle's modular nature.

Operationally, this phase was structured into two main moments: i) an initial activity of generation and discussion of design hypotheses, aimed at exploring possible innovative and/or hybrid models, developed through a Design Sprint session (Rinaldi, Busciantella-Ricci and Viviani, 2024; Knapp, Zeratsky and Kowitz, 2022), coordinated by the researchers of IDEE Lab at the University of Florence and conducted with the involvement of early-career and professional designers (8 participants); ii) a subsequent activity of comparison and selection through a focus group with MOST partners (5 participants), aimed at discussing the emerging hypotheses and collecting preliminary technical evaluations of their feasibility, useful for guiding the selection of the proposals considered most promising in terms of innovativeness and feasibility.

Finally, the Deliver phase focused on formalising the outcomes of the design exploration into systemic models and design scenarios. The outcomes were presented through conceptual maps and storyboards, which were considered distinct yet complementary tools. Conceptual maps were used to synthesise the interpretative framework

emerging from the analytical phase and to formalise the hybrid micromobility model developed during the design phase. Storyboards, on the other hand, were developed to represent some possible usage scenarios within the proposed model, illustrating in sequential form the actors, operational steps, interactions, and service flows. These scenarios do not represent validated operational solutions but rather conceptual configurations developed as design investigation tools, useful for exploring possible ways to activate the modular vehicle within the hypothesised system. The storyboards were produced with the support of image-generation artificial intelligence software.

Urban micromobility models | The analysis of existing urban micromobility models has highlighted two main operational domains: personal mobility and light urban logistics. Within the domain of personal mobility, micromobility emerges from two complementary perspectives: on the one hand, as highlighted by Abduljabbar, Liyanage and Dia (2021), it is interpreted in relation to the potential of light vehicles to enable new mobility opportunities; on the other, as shown by Zhang, Kasraian and van Wesemael (2023), such opportunities are closely dependent on the characteristics of the built environment.

In both perspectives, micromobility is predominantly configured as a system of point-to-point connections between origin and destination, aimed at both ensuring continuity of movement over short distances and integrating first- and last-mile segments with public transport infrastructures or other strategic nodes (Abduljabbar, Liyanage and Dia, 2021; Arias-Molinares et alii, 2023; Eom, Lee and Lee, 2023). In the first case, light vehicles are primarily used for relatively linear individual journeys, organised around user needs and the requirement to connect residential areas with proximity services (Zhang, Kasraian and van Wesemael, 2023). In the second case, micromobility is increasingly significant for intermodal connections along medium- to long-distance routes. Several studies show how it contributes to expanding the accessibility catchment area of public transport stations, improving the continuity of the urban mobility system and supporting integrated mobility configurations (Abduljabbar, Liyanage and Dia, 2021; Oeschger, Caulfield and Carroll, 2025). The integration between light vehicles and collective transport enables stations to extend their 'area of influence' and reduces spatial discontinuities between mobility infrastructures and the dispersed urban fabric (Luo, Li and Hampshire, 2021).

In relation to these operational conditions, bicycles and cargo bikes emerge as particularly relevant vehicles for urban micromobility, thanks to their structural simplicity, manoeuvrability, and reduced infrastructural requirements, which favour their use in dense urban contexts and in proximity connections (Pucher and Buehler, 2012). The literature shows how these vehicles have progressively taken on differentiated roles within personal mobility models: numerous studies highlight the effectiveness of the bicycle as an intermodal connector, particularly in bike-and-ride systems and, more generally, in configurations that integrate cycling mobility with collective transport (Martens, 2007; Oeschger, Caulfield and Carroll, 2025). In this same direction, some design experiences relating to personal vehicles, such as that discussed by Tosi et alii (2012), demonstrate how the folding bicycle, due to its compactness and ease of disassembly and transport, can function as a device that further facilitates physical and operational integration with other transport systems. In addition, more recent research shows growing interest in cargo bikes for private, family, and everyday mobility, highlighting their significant application potential (Betancur, Lebeau, and Macharis, 2024; Carracedo and Mostofi, 2022; Marincek, Rérat, and Lurkin, 2024).

Taken together, these developments confirm the bicycle's flexibility as a mobility vector, while also revealing progressive differentiation into specialised configurations, generally optimised for specific contexts and modes of use.

Unlike personal mobility models, light urban logistics systems present more complex operational configurations, characterised by multi-level relationships between infrastructures, logistics nodes, and distribution vectors. Within these systems, the management of goods flows requires coordination across different territorial scales, from peri-urban distribution to the final delivery point.

In recent years, the rapid growth of e-commerce and the increase in B2C (Business-to-Consumer) deliveries have intensified pressure on urban logistics chains, making last-mile distribution one of the most critical segments of the entire distribution system. This segment is associated with high operational costs, traffic congestion, and significant environmental impacts, particularly in high-density urban contexts (Allen et alii, 2018; Mangiaracina et alii, 2019). In response to these challenges, the literature highlights the potential of bicycles and cargo bikes as tools for reorganising urban freight distribution models.

In this direction, both Bachofner et alii (2022) and de Oliveira et alii (2017) frame light vehicles as possible strategies for innovation and sustainability in the urban last mile, while Schomakers et alii (2022) demonstrate, through an applied case study, how these approaches can translate into innovative cargo configurations suited to complex urban contexts. However, this potential cannot be interpreted automatically: both de Oliveira et alii (2017) and Mangiaracina et alii (2019) show that the effectiveness of such solutions does not depend solely on the performance of the vehicle, but on their integration within appropriate organisational structures and service configurations.

The adoption of such solutions is therefore often associated with the development of decentralised distribution infrastructures. In particular, urban microhubs (Katsela et alii, 2022; Günes et alii, 2024; Oliveira et alii, 2025) and nanohubs (Kania et alii, 2022) are emerging as intermediate consolidation nodes capable of receiving flows from primary logistics centres and redistributing them towards final destinations through fleets of light vehicles, particularly cargo bikes and e-cargo bikes. These configurations outline multi-level logistics structures in which high-capacity transport modes connect distribution centres to urban intermediate nodes. At the same time, light vehicles manage the fine-grained distribution in the final segment of the logistics chain. From an organisational perspective, these systems are often configured according to hierarchical models such as hub-and-spoke or two-echelon architectures, in which logistics nodes and transport vectors operate in a coordinated manner to optimise distribution flows and reduce the presence of heavy vehicles in the most densely populated urban areas (Mangiaracina et alii, 2019; Stokkink and Geroliminis, 2025).

Hybrid configurations | Between the two domains described above lies a growing set of hybrid configurations in which personal mobility and urban logistics increasingly intersect. In these models, systems for transporting people and those for distributing goods no longer operate as separate infrastructures embedded within the same urban fabric, but instead partially share resources, flows, or operational infrastructures, generating new forms of organisation of urban mobility.

A first direction of development concerns logistics models that exploit non-dedicated personal movements, transforming individual journeys into opportunistic logistics capacity. Buldeo Rai et alii (2017) frame this principle within the notion of crowd logistics, highlighting how everyday mobility flows can be partially converted into distribution capacity through the involvement of non-professional actors. Simoni et alii (2020) demonstrate, on a more applied level, how this integration can be simulated at the urban scale through various crowdshipping models, in which delivery activities are integrated into already existing routes, such as those carried out by car or public transport, thereby reducing the need for dedicated trips. In these cases, hybridisation occurs primarily at the level of flows: what changes is the operational meaning of a personal journey, which, under certain conditions, takes on a temporary logistics function.

A second direction concerns forms of infrastructural integration between mobility systems and urban logistics networks. Shafiee et alii (2026) describe an alternative last-mile system that combines microhubs and crowdshipping within a coordinated structure, making the intermediate node the point of connection between dedicated logistics vectors and distributed delivery capacity. Stokkink and Geroliminis (2025) propose an even more explicit model of multimodal hybridisation, in which transport by road vehicles, metro systems, and micromobility is coordinated within a hierarchical last-mile structure, in which the metro system functions almost as a moving microhub. In the same direction, Oliveira et alii (2025) describe a MaaS (Mobility as a Service) platform that integrates personal mobility and urban distribution through the combined use of shared micromobility, crowdshipping, and a network of microhubs. In this second group of models, hybridisation is not constructed solely through the overlap of personal and logistics flows, but also through the combination of nodes, networks, and different transport vectors within the same service configuration.

Although these models do not always refer specifically to configurations centred on bicycles or cargo bikes, they remain highly relevant, as they make visible forms of integration between personal mobility and urban logistics that can potentially be interpreted within micromobility frameworks. Taken together, they highlight a growing permeability between the two domains and show how hybridisation already constitutes a multi-level strategic and organisational factor. From this perspective, the hypothesis of a modular vehicle suggests a further design direction, capable of strengthening these

forms of hybridisation and extending them across the vehicle's multiple usage practices.

Synthesis and mapping of strategic factors | The comparative analysis of micromobility models emerging from the literature and case studies has highlighted the recurrence of certain structural components that define their functional architecture: a) operational nodes, b) relational network structures, c) mobility vectors, d) operational actors, e) flow coordination logics. Taken together, these five elements describe the main dimensions through which urban micromobility systems take shape and constitute an interpretative framework useful for analysing different transport configurations (Fig. 11).

Operational nodes represent the points of origin, consolidation, or destination of flows within micromobility systems. In the case of personal mobility, they predominantly correspond to departure and arrival locations or interchange nodes (stations, parking areas, etc.). In urban logistics systems, on the other hand, they take the form of primary distribution centres, decentralised nodes (microhubs, nanohubs, etc.), or delivery points distributed across the urban space. Relational network structures describe how nodes are connected, defining the overall configuration of a system, as well as the hierarchical principle and infrastructural support that enable its functioning (cycling networks, road networks, etc.). Depending on the operational context, the network may take distributed forms, typical of peer-to-peer personal mobility, or multi-level configurations, as in hub-and-spoke and two-echelon models characteristic of urban logistics, but also observable in intermodal personal transport systems.

If nodes and structures define the system's operational space, mobility vectors represent the means by which people or goods move within it. In the context of micromobility, light vehicles play a central role in ensuring fine-grained connections at the urban scale, operating both as autonomous means for direct journeys and as integrative components of multimodal systems, in interaction with traditional vehicles (cars, vans, trucks, etc.) and collective transport solutions (buses, metro, trains, etc.). Operational actors correspond to the subjects who use, manage, or coordinate these vectors within the urban space: users, logistics operators, digital platforms, independent couriers, or shared mobility service providers. In this sense, vectors and actors constitute the dynamic component of the system, enabling the activation of relationships between nodes and the network's operational functioning.

Finally, flow coordination logics describe how the relationships among nodes, vectors, and actors are operationalised over time. These include service models, organisational protocols, and technological devices that regulate access, allocation, and management of flows, such as sharing systems, on-demand delivery platforms, and structured postal and logistics services. In this sense, coordination concerns not only the spatial distribution of movements but also how the system organises interaction among subjects, vehicles, and functions.

A hybrid model enabled by modularity | The relationship established between the strategic factors identified in the analysis and the characteristics of the modular vehicle developed within the MOST-Spoke 5 project enabled exploration of modularity across different levels of integration. At an initial level, the vehicle had already demonstrated the potential to expand its range of uses within existing micromobility models, introducing incremental advantages in ease of disassembly, adaptability in intermodal contexts, reduced storage requirements, and multifunctionality (Rinaldi and Lagrimino, 2026).

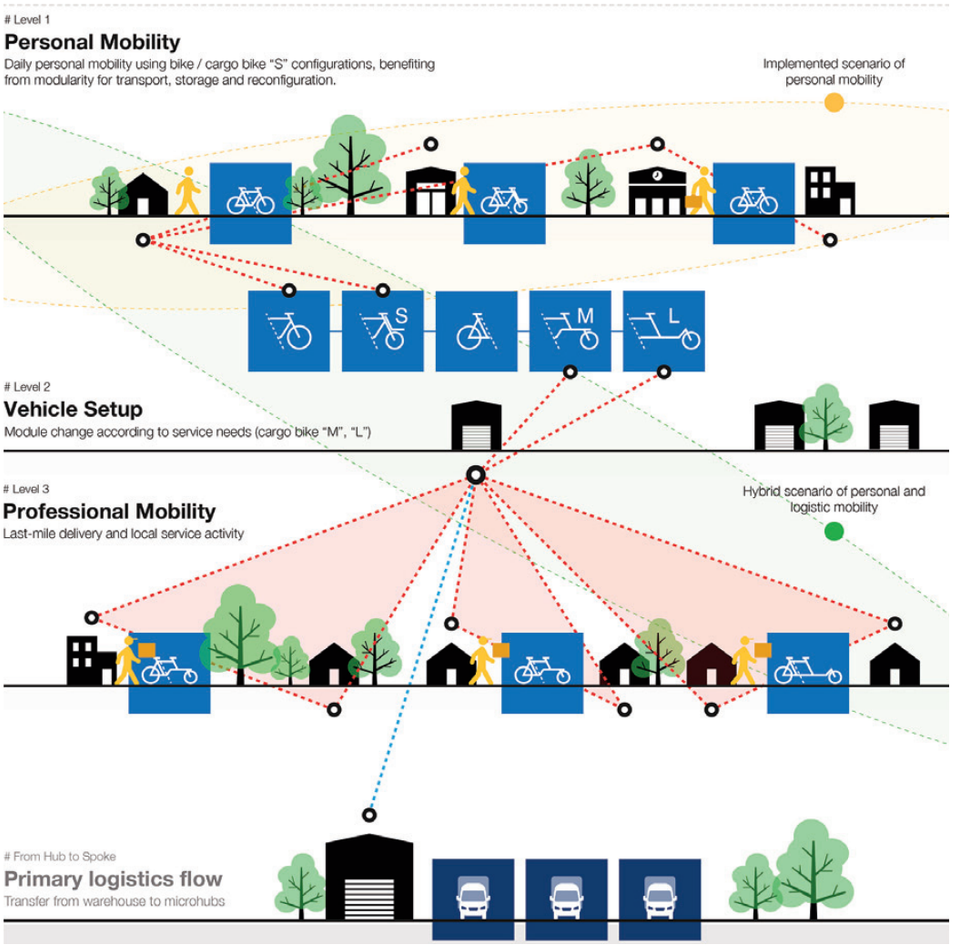


Fig. 12 | Diagram of the Hybrid Professional Micromobility (HPM) model. The figure illustrates the three main stages of the proposed operational sequence: personal access mobility, vehicle reconfiguration at an operational node, and professional mobility for delivery or service activities (credit: the Authors, 2025).

Exploratory design work at the systemic scale, however, highlighted the possibility of a shift in perspective, in which modularity is no longer limited to improving the adaptability of the vehicle within established models, but becomes the enabling condition for defining a novel hybrid configuration between personal mobility and professional activity. In this regard, a model of Hybrid Professional Micromobility (HPM) was developed, enabling the integration of individual mobility with urban distribution or service activities. The distinctive feature of the model is that hybridisation does not occur solely at the level of flows but also directly at the level of the vehicle. The vehicle is therefore not interpreted merely as a technical artefact, but as a design device capable of enabling new operational configurations within urban micromobility systems. This shift responds to a recurring limitation in conventional models of personal light mobility and logistics, in which the distinction between the vehicles used generally remains clear-cut: a vehicle is designed and used for a specific application domain, while any forms of integration mainly concern the sharing of flows or coordination between different infrastructures. In the model proposed here, by contrast, the vehicle ceases to be monofunctional and becomes an adaptive platform capable of assuming different roles throughout the same working day, thanks to its modular design.

In general terms, the proposed model can be described as a sequence structured into three stages. The first concerns personal access mobility, in which the user uses the modular vehicle in its bicycle or e-bike configuration for daily movement between home and the workplace or between different points within the city. The second stage coincides with the vehicle's reconfiguration at an operational node, such as a logistics hub, service facility, or urban support point, where the vehicle is adapted to its professional function by replacing the front module and, where necessary, activating the electric component. The third stage concerns professional mobility, in which the reconfigured vehicle is used for urban distribution activities, light goods delivery, or proximity services. The possibility of reversing this sequence at the end of the day makes the system reversible and potentially



Fig. 13 | Scenario 1: last-mile delivery service organised through an urban microhub. The diagram illustrates how the modular vehicle can support continuity between personal commuting and professional use by adapting its cargo configuration to delivery conditions, route requirements, and service organisation: daily commute to the logistics microhub in bicycle mode; arrival at the microhub and preparation for delivery activities; bicycle disassembly and installation of the cargo module; parcel loading and route planning at the microhub; departure for last-mile distribution operations; parcel delivery within the urban service area; return to the microhub for bicycle reconfiguration and cargo module removal; return journey home in bicycle mode (credit: the Authors, 2025).

circular (Fig. 12). This operational sequence corresponds to a series of advantages that redefine the relationship between user, vehicle, service, and work organisation. Firstly, the model makes it possible to overcome the conventional separation between personal and professional vehicles, introducing continuity of use between everyday mobility and work-related activities: the same vehicle can thus be incorporated into different operational sequences throughout the day. From this perspective, modularity not only affects the use of the vehicle but also opens up the possibility of rethinking the logics of access, availability, and management, shifting the focus from ownership of the asset to its capacity to be temporarily reconfigured and integrated into different service systems.

A second advantage lies in the ability to adapt the vehicle configuration to actual service conditions. The availability of different cargo modules, varying in capacity and size, allows the vehicle to be calibrated in relation to the volume of goods, the nature of the load, route characteristics, or the frequency of return to the logistics node. This aspect is particularly relevant both for logistics planning and user experience, as these are pedal-assisted vehicles: weight distribution, frame compactness, and overall dimensions significantly affect manoeuvrability, ease of handling, and operational efficiency.

A third advantage concerns fleet management and maintenance processes. In traditional systems, increases in operational volumes or changes in service requirements often require the acquisition of entirely new vehicles, with particularly high costs for pedal-assisted light vehicles. Within a modular logic, however, fleet adaptation can also occur through the replacement, integration, or upgrading of individual functional modules, while maintaining the vehicle's base platform and reusing existing components. This enables a more gradual, adaptive approach to fleet management, reducing investment rigidity and introducing greater flexibility in both maintenance and the evolution of the vehicle system.

The multiple potential implications of the HPM model can be further clarified through two illustrative scenarios that demonstrate how vehicle modularity can operate within both existing logistics systems and more advanced configurations of temporary vehicle sharing.

A first scenario concerns last-mile delivery services organised through urban microhubs. In this case, the modular vehicle ensures continuity of use, adaptation of the vehicle to the mission, and greater flexibility in fleet management. The worker can reach the logistics node in its bicycle configuration, reconfigure the vehicle according to the load and delivery route, and use the most appropriate module depending on the volume of goods, frequency of return to the hub, or route conditions. In this configuration, modularity not only improves the performance of the individual vehicle but also makes the overall service organisation more adaptable (Fig. 13).

A second scenario, more prospective in nature, concerns temporary forms of integration between personal use and logistics services. In this case, the user's personal vehicle, rather than simply being parked at an interchange node or microhub, can be temporarily incorporated into a service system, reconfigured for light logistics activities, and subsequently returned to its original func-



Fig. 14 | Scenario 2: temporary integration between personal mobility and logistics services. The figure explores a prospective scenario in which a personal vehicle, instead of remaining parked and unused, is temporarily integrated into a logistics service, reconfigured for light delivery activities, and later returned to its original function. The scenario highlights the potential implications of modularity for access, ownership, service integration, and shared-use models: daily commute to the logistics microhub in personal bicycle mode, where the commuter leaves the bike before going to work and the microhub provides charging, maintenance, secure storage, and temporary integration into the local logistics network; arrival of a logistics operator at the microhub to start a shift of on-demand urban deliveries, with the bike reconfigured by the microhub operator using the cargo 'S' module for small parcel transport, temporarily becoming part of the neighbourhood delivery service; subsequent reconfiguration of the same bike with the cargo 'L' module for transporting heavier goods; evening return of the owner to the microhub to retrieve the bicycle, restored to its personal configuration with a charged battery and basic maintenance completed, before riding home (credit: the Authors, 2025).

tion. Such a configuration introduces a different relationship between user, infrastructure, and service, raising new questions regarding access, ownership, maintenance, and vehicle availability. In this sense, modularity acts not only as a technical solution, but also as a lever for imagining more flexible and reversible shared-use models (Fig. 14).

Study limitations, barriers, and transferability | The HPM model developed represents a conceptual configuration produced through a Research through Design approach and does not constitute a solution already validated in real-world conditions. The contribution has made it possible to argue, with sufficient coherence, the design and systemic plausibility of the model; however, it has not yet allowed for empirical verification of its operational effectiveness, organisational and economic sustainability, or robustness within real contexts. The relationships between vehicle architecture, service organisation, and usage practices therefore require further investigation through applied experimentation, comparative analysis, and impact assessment.

In addition to the limitations related to the lack of empirical validation, the implementation of the model also encounters several barriers of a regulatory, organisational, and economic nature. These include, at the product level, issues relating to regulation, liability of use, homologation, safety, insurance of the modular vehicle, and the definition of ownership and maintenance regimes in shared-use contexts. At the systemic level, further critical issues arise regarding the need for dedicated infrastructure and operational nodes, with implications for urban space, operational management, and service sustainability. These aspects are compounded by potential challenges linked to the social acceptability of the model and its actual economic sustainability over the medium term.

The transferability of the model appears plausible primarily in dense urban contexts characterised by proximity networks, cycling infrastructures, decentralised logistics systems, or favourable conditions for intermodality. It is, however, more problematic in dispersed, strongly car-dependent environments or in contexts lacking intermediate nodes and supporting services. In this sense, the model cannot be considered universally applicable, but rather as an adaptable configuration, whose effectiveness depends on specific settlement, infrastructural, and organisational conditions.

SDGs, synergies, and trade-offs | With reference to the Sustainable Development Goals (SDGs), the contribution highlights potential impacts particularly in relation to SDGs 9, 11, 12, and 13. The most immediate benefits concern SDG 9 (Industry, Innovation and Infrastructure), insofar as modularity applied to bicycles and cargo bikes introduces opportunities for innovation not only at the product level, but also in the technical and managerial organisation of fleets. The reconfigurability of the vehicle makes it possible to adapt it to different uses, reduce the rigidity of monofunctional vehicles, and envisage progressive updating and maintenance strategies based on the replacement of components and modules rather than the vehicle as a whole. Alongside this dimension, further potential impacts emerge at the urban and environmental levels. Regarding SDG 11 (Sustainable Cities and Communities), the model suggests integrating per-

sonal mobility, proximity services, and light distribution networks more closely, thereby developing more flexible, fine-grained mobility systems compatible with high-density contexts or sensitive urban fabrics. In relation to SDG 13 (Climate Action), these configurations may, at least indirectly, lead to a reduction in the environmental impact of certain segments of urban mobility and logistics by increasing the use of low-emission light vehicles and potentially substituting more bulky, impactful vehicles in specific last-mile segments.

Within this framework, SDG 12 (Responsible Consumption and Production) assumes a transversal role, as the proposed model engages with the theme of responsible resource use across the entire product life cycle, from vehicle production to its use and management, up to the systemic configuration of mobility and logistics services. Indeed, modularity not only affects how the vehicle is designed and updated but also suggests potentially more rational forms of vehicle use, functional organisation, and distribution of material, energy, and operational resources, reducing rigidity between vehicles, uses, and services.

These potential impacts, however, should not be assumed automatically or linearly. The HPM model also identifies potential trade-offs and criticalities, both related to the sustainability of the proposed services and to the material and organisational conditions required for their implementation. In addition, there is the risk of indirect effects that may not necessarily align with the expected benefits of the model. In this sense, the synergies between SDGs 9, 11, 12, and 13 appear plausible, but depend on implementation, regulation, and management conditions that, given the exploratory nature of this contribution, cannot yet be empirically verified.

Conclusions | The research has explored the potential of modularity as a design lever capable of linking personal mobility and light urban logistics, taking as its starting point a reconfigurable vehicle developed within the MOST-Spoke 5 project. In line with the most recent orientations in the literature, which interpret micromobility not merely as a set of light vehicles but as a system composed of infrastructures, services, actors, and organisational logics, the results show how modularity can extend its effects from the scale of the product to that of the system. From this perspective, the main contribution of the study lies in establishing a relationship between the reconfigurability of the vehicle and the architecture of urban micromobility models, demonstrating the potential of modularity as a lever for implementing and hybridising personal mobility and proximity logistics.

Taken together, the findings make it possible to formulate a structured response to the three research questions introduced at the beginning of the contribution, highlighting three main results: 1) the identification of recurring structural factors in urban micromobility models for the transport of people and goods; 2) the recognition of the potential of modularity to generate operational and functional advantages across the different phases of vehicle use; 3) the possibility that these properties may contribute to enabling hybrid service configurations between personal mobility and urban logistics.

Based on these outcomes, the first result is the construction of an interpretative framework grounded in five recurring factors, which allows for the analysis of different configurations of urban micromobility in a transversal manner. In this sense, it does not serve merely as a descriptive function, but also operates as an analytical and operational tool, useful both for comparing existing models and for guiding further design explorations relating to the systemic organisation of urban mobility (Fig. 11).

The second result concerns the Hybrid Professional Micromobility (HPM) model, which explores the role of modularity in integrating personal mobility and urban logistics at the design level. The model makes it possible to envision a hybrid service configuration in which the same vehicle, on a shared, reversible platform, can assume different functions during different phases of use. Within this configuration, the advantages more directly related to the operational dimension of the vehicle also become evident: in personal mobility, greater adaptability and flexibility of use; in the logistics phase, improved calibration in relation to load, operational mission, and route constraints, with further implications for storage, maintenance, and fleet management (Figg. 12-14).

Acknowledgements

This paper is the result of a shared reflection by the Authors. Notwithstanding this, the Introduction, 'Methodology', 'Study limitations, barriers, and transferability', 'SDGs, synergies, and trade-offs', and 'Conclusions' sections are attributed to A. Rinaldi, while the sections 'Urban micromobility models', 'Hybrid configurations', 'Synthesis and mapping of strategic factors', 'A hybrid model enabled by modularity' are attributed to J. Lagrimino.

Part of the activities described in this paper was carried out within the research project Spoke 5 'Light Vehicle and Active Mobility' of the National Centre for Sustainable Mobility (MOST), funded by the NextGenerationEU Programme within the framework of the National Recovery and Resilience Plan (PNRR), Mission 4, Component 2, Investment 1.4 (D.D. 1033 of 17 June 2022, CN00000023). Specifically, the paper presents part of the results developed by the Authors within the IDEE Lab (Innovation in Design and Engineering Laboratory) of the Department of Architecture at the University of Florence, within Work Package 2.1 'Vehicle Design, Materials and LCA' (WP Leader: A. Rinaldi), dedicated to the design and prototyping of light vehicles and to the exploration of modularity as a lever for product and system innovation, within the framework of the MOST research programme, active over the three-year period 2022-2025. The research project was concluded in December 2025.

Notes

1) For more information, see the webpage: centronazionalemost.it/ [Accessed 7 April 2026].

2) For more information, see the webpage: miro.com/it/ [Accessed 16 April 2026].

References

Abduljabbar, R. L., Liyanage, S. and Dia, H. (2021), "The role of micro-mobility in shaping sustainable cities – A systematic literature review", in *Transportation Research part D | Transport and Environment*, vol. 92, article 102734, pp. 1-19. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.trd.2021.102734 [Accessed 7 April 2026].

Allen, J., Piecyk, M., Piotrowska, M., McLeod, F., Cherrett, T., Ghali, K., Nguyen, T., Bektas, T., Bates, O., Friday, A., Wise, S. and Austwick, M. (2018), "Understanding the impact of e-commerce on last-mile light goods vehicle activity in urban areas – The case of London", in *Transportation Research Part D | Transport and Environment*, vol. 61, part B, pp. 325-338. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.trd.2017.07.020 [Accessed 7 April 2026].

Archer, B. (1995), "The nature of research", in *Co-Design Journal*, vol. 2, issue 11, pp. 6-13. [Online] Available at: ia801302.us.archive.org/4/items/TheNatureOfResearch/Archer1995Codesign.pdf [Accessed 7 April 2026].

Arias-Molinares, D., Xu, Y., Büttner, B. and Duran-Rodas, D. (2023), "Exploring key spatial determinants for mobility hub placement based on micromobility ridership", in *Journal of Transport Geography*, vol. 110, article 103621, pp. 1-14. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2023.103621 [Accessed 7 April 2026].

Bachofner, M., Lemardelé, C., Estrada, M. and Pagès, L. (2022), "City logistics – Challenges and opportunities for technology providers", in *Journal of Urban Mobility*, vol. 2, article 100020, pp. 1-10. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.urbmob.2022.100020 [Accessed 7 April 2026].

Baldwin, C. Y. and Clark, K. B. (1994), "Modularity-in-design – An analysis based on the theory of real options", in *Harvard Business School*, pp. 1-44. [Online] Available at: academia.edu/download/44259940/Modularity-In-Design_An_Analysis_Based_O20160331-25099-aenprh.pdf [Accessed 7 April 2026].

Betancur Arenas, J., Lebeau, P. and Macharis, C. (2024), "From regular cyclist to cargo bike user? – A step closer to enhancing cargo bike culture", in McNally, C., Carroll, P., Martinez-Pastor, B., Ghosh, B., Efthymiou, M. and Valantasis-Kanellos, N. (eds), *Transport Transitions – Advancing Sustainable and Inclusive Mobility – Proceedings of the 10th TRA Conference – Volume 2, Dublin, Ireland, April 15-18, 2024*, Springer, Cham, Lecture Notes in Mobility, pp. 134-139. [Online] Available at: doi.org/10.1007/978-3-031-85578-8_18 [Accessed 7 April 2026].

Bruno, D., Palmieri, S., Palomba, R., D'Alessandro, F. and Bisson, M. (2024), "Infrastrutture di mobilità intelligenti e sostenibili – Un nuovo sistema di connessioni urbane | Smart and sustainable mobility infrastructure – A new system of urban connections", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 15, pp. 286-295. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/15232024 [Accessed 7 April 2026].

Buehler, R. and Pucher, J. (eds) (2021), *Cycling for sustainable cities*, MIT Press, Cambridge (MA).

Buldeo Rai, H., Verlinde, S., Merckx, J. and Macharis, C. (2017), "Crowd logistics – An opportunity for more sustainable urban freight transport?", in *European Transport Research Review*, vol. 9, issue 3, article 39, pp. 1-13. [Online] Available at: doi.org/10.1007/s12544-017-0256-6 [Accessed 7 April 2026].

Canessa, N. V. and Centanaro, C. (2024), "Co(mplex)city – Utente come sensore urbano e mobilità accessibile nel progetto Mobiquity | Co(mplex)city – User as urban sensor and accessible mobility in the Mobiquity project", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 16, pp. 88-97. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/1672024 [Accessed 7 April 2026].

Carracedo, D. and Mostofi, H. (2022), "Electric cargo bikes in urban areas – A new mobility option for private transportation", in *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, vol. 16, article 100705, pp. 1-11. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.trip.2022.100705 [Accessed 7 April 2026].

de Oliveira, C. M., Albergaria de Mello Bandeira, R., Vasconcelos Goes, G., Schmitz Gonçalves, D. N. and De Almeida D'Agosto, M. (2017), "Sustainable vehicles-based alternatives in last mile distribution of urban freight transport – A systematic literature review", in *Sustainability*, vol. 9, issue 8, article 1324, pp. 1-15. [Online] Available at: doi.org/10.3390/su9081324 [Accessed 7 April 2026].

Eom, J. K., Lee, K. S. and Lee, J. (2023), "Exploring micromobility mode preferences for last-mile trips from subway stations", in *Journal of Public Transportation*, vol. 25, article 100054, pp. 1-11. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.jpubtr.2023.100054 [Accessed 7 April 2026].

European Commission (2019), *Communication from the Commission to the European Parliament, the European Council, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions – The European Green Deal*, document 52019DC0640, COM/2019/640 final. [Online] Available at: eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52019DC0640 [Accessed 7 April 2026].

Fabbri, I. (2023), "Smart Hubs – Una rete di oggetti urbani multifunzionali a supporto della micromobilità a Ferrara | Smart Hubs – A network of multifunctional urban objects to support micromobility in Ferrara", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 14, pp. 304-315. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/14262023 [Accessed 7 April 2026].

Galvin, P. and Morkel, A. (2001), "Modularity on industry structure – The case of the world – The effect of product bicycle industry", in *Industry and Innovation*, vol. 8, issue 1, pp. 31-47. [Online] Available at: dx.doi.org/10.1080/13662710120034392 [Accessed 7 April 2026].

Gerring, J. (2006), *Case Study Research – Principles and Practices*, Cambridge University Press, Cambridge (MA).

Gunes, S., Fried, T. and Goodchild, A. (2024), "Seattle microhub delivery pilot – Evaluating emission impacts and stakeholder engagement", in *Case Studies on Transport Policy*, vol. 15, article 101119, pp. 1-10. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.cstp.2023.101119 [Accessed 7 April 2026].

Jonas, W. (2015), "Research through design is more than just a new form of disseminating design outcomes", in *Constructivist Foundations*, vol. 11, issue 1, pp. 32-36. [Online] Available at: constructivist.info/11/1/032.jonas [Accessed 7 April 2026].

Kania, M., Rolf, B., Assmann, T. and Zadek, H. (2022), "The smaller, the better? – Nano-hubs for cycle logistics as an urban-friendly alternative to micro-hubs", in *Logistics Journal | Proceedings*, vol. 18, pp. 1-12. [Online] Available at: doi.org/10.2195/lj_proc_kania_en_202211_01 [Accessed 7 April 2026].

Katsela, K., Gunes, S., Fried, T., Goodchild, A. and Browne, M. (2022), "Defining urban freight microhubs – A case study analysis", in *Sustainability*, vol. 14, issue 1, article 532, pp. 1-27. [Online] Available at: doi.org/10.3390/su14010532 [Accessed 7 April 2026].

Knapp, J., Zeratsky, J. and Kowitz, B. (2022), *Sprint – Come risolvere grandi problemi e testare nuove idee in soli cinque giorni*, Edizioni LSWR, Milano.

La Regina, R., Adinolfi, T., Pappalardo, C. M. and Guida, D. (2025), "Definition of the Functional Requirements for the Design of an Autonomous Light-Weight Pedal Assisted Urban Vehicle", in Karabegović, I., Kovačević, A. and Mandžuka, S. (eds), *New Technologies, Development and Applications – Proceedings of the 11th International Conference New Technologies and Applications, Sarajevo, Bosnia and Herzegovina, June 26-28, 2025*, Lecture Notes in Networks and Systems, vol. 1482, Springer, Cham, pp. 474-485. [Online] Available at: doi.org/10.1007/978-3-031-95194-7_49 [Accessed 7 April 2026].

Luo, Q., Li, S. and Hampshire, R. C. (2021), "Optimal design of intermodal mobility networks under uncertainty – Connecting micromobility with mobility-on-demand transit", in *EURO Journal on Transportation and Logistics*, vol. 10, article 100045, pp. 1-14. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.ejtl.2021.100045 [Accessed 7 April 2026].

Mangiaracina, R., Perego, A., Seghezzi, A. and Tumino, A. (2019), "Innovative solutions to increase last-mile delivery efficiency in B2C e-commerce – A literature review", in *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, vol. 49, issue 9, pp. 901-920. [Online] Available at: doi.org/10.1108/IJPDLM-02-2019-0048 [Accessed 7 April 2026].

Marincek, D., Rérat, P. and Lurkin, V. (2024), "Cargo bikes for personal transport – A user segmentation based on motivations for use", in *International Journal of Sustainable Transportation*, vol. 18, issue 9, pp. 751-764. [Online] Available at: doi.org/10.1080/15568318.2024.2402753 [Accessed 7 April 2026].

Martens, K. (2007), "Promoting bike-and-ride – The Dutch experience", in *Transportation Research Part A | Policy and Practice*, vol. 41, issue 4, pp. 326-338. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.tra.2006.09.010 [Accessed 7 April 2026].

Oeschger, G., Caulfield, B., and Carroll, P. (2025), "User characteristics and preferences for micromobility use in first-and last-mile journeys in Dublin, Ireland", in *Travel Behaviour and Society*, vol. 38, article 100926, pp. 1-13. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.tbs.2024.100926 [Accessed 7 April 2026].

Oliveira, L. K., Oliveira, I. K., Leite Nascimento, C. de O., Marcucci, E. and Gatta, V. (2025), "Mobility as a service for freight and passenger transport – Identifying a microhubs network to promote crowdshipping service", in *Case Studies on Transport Policy*, vol. 19, article 101356, pp. 1-12. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.cstp.2024.101356 [Accessed 16 April 2026].

Pietroni, L., Di Stefano, A. and Galloppo, D. (2023), "Il design modulare verso l'economia circolare – Dal 'fare per disfare' al 'fare per rifare' | Modular design towards the circular economy – From 'making to unmake' to 'making to remake'", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 14, pp. 274-283. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/14232023 [Accessed 7 April 2026]

Pucher, J. and Buehler, R. (eds) (2012), *City cycling*, MIT Press, Cambridge (MA).

Rinaldi, A. and Lagrimino, J. (2026), "Modular and Adaptive Approach for Advancing Innovation and Sustainability in Light Vehicles Design", in *Applied Sciences*, vol. 16, issue 3, article 1151, pp. 1-34. [Online] Available at: doi.org/10.3390/app16031151 [Accessed 7 April 2026].

Rinaldi, A., Busciantella-Ricci, D. and Viviani, S. (2024), "Design for Movability – A New Design Research Challenge for Sustainable Design Scenarios in Urban Mobility", in *For Nature / With Nature – New sustainable design scenarios*, Springer, Cham, Springer Series in Design and Innovation, vol. 38, pp. 929-949. [Online] Available at: doi.org/10.1007/978-3-031-53122-4_55 [Accessed 16 April 2026].

Schomakers, E. M., Klatte, M., Lotz, V., Biermann, H., Kober, F. and Ziefle, M. (2022), "Analysis of the potential of a new concept for urban last-mile delivery – Ducktrain", in *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, vol. 14, article 100579, pp. 1-10. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.trip.2022.100579 [Accessed 7 April 2026].

Shafiee, A., Moghaddam, H. R., Ballare, S. and Lin, J. (2026), "An alternative last-mile delivery system – Leveraging microhubs and crowdshipping", in *Transportation Research Part D | Transport and Environment*, vol. 154, article 105239, pp. 1-28. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.trd.2026.105239 [Accessed 7 April 2026].

Simoni, M. D., Marcucci, E., Gatta, V. and Claudel, C. G. (2020), "Potential last-mile impacts of crowdshipping services – A simulation-based evaluation", in *Transportation*, vol. 47, issue 4, pp. 1933-1954. [Online] Available at: doi.org/10.1007/s11116-019-10028-4 [Accessed 7 April 2026].

Sommariva, E. and Canessa, N. (2024), "Bicycle Infrascapes – La mobilità ciclabile come occasione di rigenerazione urbana e progetto dello spazio pubblico", in Bricocoli, M. and Pezzagno, M. (eds), *Atti della XXV Conferenza Nazionale SIU 'Transizioni, giustizia spaziale e progetto di territorio', Cagliari, Italy, June 15-16, 2023*, Planum, Roma, pp. 303-312. [Online] Available at: hdl.handle.net/11567/1190036 [Accessed 7 April 2026].

Stokkink, P. and Geroliminis, N. (2025), "On the optimal micro-hub locations in a multimodal last-mile delivery system", in *Transportation Research Part E | Logistics and Transportation Review*, vol. 203, article 104344, pp. 1-15. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.tre.2025.104344 [Accessed 7 April 2026].

Tamborrini, P. and Cretaio, S. (2023), "Relazioni modulari negli spazi di lavoro – Approcci data-driven per progettarne il futuro | Modular relations in work environments – Data-driven approaches to design their future", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 14, pp. 284-293. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/14242023 [Accessed 16 April 2026].

Tosi, F., Belli, A., Rinaldi, A. and Tucci, G. (2012), "The Intermodal Bike: multimodal integration of cycling mobility through product and process innovations in bicycle design", in *Work | A Journal of Prevention, Assessment & Rehabilitation*, vol. 41, issue S1, pp. 1501-1506. [Online] Available at: doi.org/10.3233/WOR-2012-0344-1501 [Accessed 16 April 2026].

Van Cauwenberg, J., De Bourdeaudhuij, I., Clarys, P., De Geus, B. and Deforche, B. (2019), "E-bikes among older adults – Benefits, disadvantages, usage and crash characteristics", in *Transportation*, vol. 46, issue 6, pp. 2151-2172. [Online] Available at: doi.org/10.1007/s11116-018-9919-y [Accessed 7 April 2026].

Viviani, S., Gulino, M.-S., Rinaldi, A., and Vangi, D. (2024), "An interdisciplinary double-diamond design thinking model for urban transport product innovation – A design framework for innovation combining mixed methods for developing the electric microvehicle Leonardo Project", in *Energies*, vol. 17, issue 23, article 5918, pp. 1-23. [Online] Available at: doi.org/10.3390/en17235918 [Accessed 7 April 2026].

Zhang, Y., Kasraian, D. and van Wesemael, P. (2023), "Built environment and micro-mobility – A systematic review of international literature", in *Journal of Transport and Land Use*, vol. 16, issue 1, pp. 293-317. [Online] Available at: jstor.org/stable/48758162 [Accessed 7 April 2026].

AGATHÓN – International Journal of Architecture, Art and Design | n. 19 | 2026 | pp. 482-497
ISSN print: 2464-9309 – ISSN online: 2532-683X | doi.org/10.69143/2464-9309/19282026

Article Info

Received 10 March 2026
Revised 10 April 2026
Accepted 13 April 2026
Published 30 June 2026

APPRENDIMENTO IMMERSIVO PER AULE RESILIENTI
Infrastruttura digitale per arredi salvavita

IMMERSIVE LEARNING FOR RESILIENT CLASSROOMS
Digital infrastructure for life-saving furniture

Federico Orfeo Oppedisano, Daniele Rossi, Manuel Scortichini

Abstract

Nelle aree ad elevata pericolosità sismica la sicurezza delle scuole dipende non solo dalle prestazioni strutturali degli edifici, ma anche dalla capacità di riconoscere e utilizzare correttamente i dispositivi di protezione e le procedure operative. In tale ottica il contributo presenta lo sviluppo di un Immersive Learning Environment (ILE) come infrastruttura digitale socio-tecnica a supporto del Life Saving Furniture System (LSFS), sviluppato nell'ambito del programma di ricerca interuniversitario Vitality. L'ILE integra realtà virtuale, contenuti a 360° e realtà aumentata, basandosi su un gemello digitale statico dell'aula. La ricerca adotta un approccio di ricerca attraverso il design e una sperimentazione pilota con un modello ibrido. I risultati preliminari indicano una migliore comprensibilità del sistema LSFS, un profilo di usabilità complessivamente positivo e segnali promettenti sul piano della risposta procedurale.

In areas of high seismic risk, school safety depends not only on the structural performance of buildings, but also on occupants' ability to recognise and correctly use protective devices and operational procedures. With this in mind, the paper presents the development of an Immersive Learning Environment (ILE) conceived as a digital socio-technical infrastructure supporting the Life Saving Furniture System (LSFS), developed within the inter-university research programme Vitality. The ILE integrates virtual reality, 360° content and augmented reality, relying on a static digital twin of the classroom. The research adopts a design-led approach, combined with hybrid model-based pilot experimentation. Preliminary results suggest improved understanding of the LSFS, an overall positive usability profile, and encouraging indications of procedural responsiveness.

Keywords

ambiente di apprendimento immersivo, infrastruttura digitale, gemello digitale, preparazione sismica, arredi salvavita

immersive learning environment, digital infrastructure, digital twin, seismic preparedness, life-saving furniture

Federico Orfeo Oppedisano, Associate Professor of Industrial Design at the School of Architecture and Design of the University of Camerino (Italy), conducts research on communication design, images in digital media, immersive virtual reality for cultural heritage, colour in design culture, and design for childhood, with a focus on technology-mediated learning environments and social communication. E-mail: federico.oppedisano@unicam.it

Daniele Rossi is a Full Professor of Drawing at the School of Architecture and Design, University of Camerino (Italy). His research explores digital representation in architecture and design, with a focus on 3D modelling and advanced digital morphogenesis, photogrammetric surveying and visualisation, and VR/AR immersive environments as spatial media for narrative, communication, and technology-mediated learning. E-mail: daniele.rossi@unicam.it

Manuel Scortichini, Researcher in Industrial Design at the University of Camerino (SAAD, Ascoli Piceno, Italy), focuses his research on the relationship between museums and visitors, design for interaction and cultural heritage, with particular attention to user engagement in interactive exhibitions. E-mail: manuel.scortichini@unicam.it



Nelle aree ad alto rischio sismico la resilienza degli edifici scolastici non si limita alla prestazione strutturale, ma dipende anche dalla capacità degli occupanti di riconoscere, attivare e utilizzare correttamente i dispositivi di sicurezza predisposti negli ambienti. L'innovazione tecnica rimane fragile quando è difficile da riconoscere nell'uso quotidiano e non trasferibile tra contesti e gruppi di utenti diversi (Pietroni, Mascitti and Galloppo, 2021). Il problema non è meramente tecnico ma riguarda da un lato la mediazione tra artefatto, corpo e spazio, dall'altro le condizioni che rendono possibile un'azione corretta e tempestiva in condizioni di stress controllato, in linea con gli studi che hanno mostrato come il comportamento in caso di terremoto sia influenzato da fattori situazionali, percettivi e contestuali (Alexander, 1990).

In tale ottica il contributo presenta il Life Saving Furniture System (LSFS), un sistema di arredo protettivo per ambienti scolastici sviluppato nell'ambito del programma Vitality (Spoke 6, WP3) con l'obiettivo di guidare posture e comportamenti durante un evento sismico attraverso un insieme coordinato di elementi di arredo che integrano funzione protettiva e funzione didattica (Pietroni, Mascitti and Galloppo, 2021; Pietroni et alii, 2025; Fig. 1).

L'ipotesi di ricerca è che l'apprendimento immersivo, quando integrato nel processo di progetto, non debba essere trattato come un livello di formazione aggiuntivo, bensì come una componente dell'innovazione stessa, capace di ridurre l'ambiguità interpretativa, rafforzare la memoria procedurale e rendere leggibile la relazione tra corpo, arredo e spazio in condizioni di stress controllato. In questa prospettiva l'Immersive Learning Environment (ILE) non è un accessorio del LSFS, ma la sua infrastruttura digitale abilitante, intesa come sistema capace di mettere in relazione oggetto, spazio, contenuti e processi di apprendimento in un quadro di crescente complessità del progetto digitale (Valenti et alii, 2025; Davidová, Barath and Dickinson, 2023; Nava and Melis, 2024).

Alla luce di tali premesse il contributo intende colmare un duplice vuoto di ricerca: da un lato la limitata integrazione tra dispositivi fisici di protezione, apprendimento procedurale e infrastrutture digitali per la preparazione sismica, dall'altro la carenza di protocolli sperimentali capaci di connettere in modo coerente oggetto fisico, gemello digitale e valutazione dei comportamenti in condizioni di stress controllato. In questa prospettiva il contributo propone un avanzamento su tre piani: l'innovazione dell'oggetto, rappresentata dal Life Saving Furniture System; l'innovazione di sistema, rappresentata dall'Immersive Learning Environment, inteso non come supporto accessorio ma come infrastruttura sociotecnica dell'apprendimento; l'innovazione metodologica, rappresentata dal ciclo fisico-virtuale-fisico, dalla costruzione del gemello digitale e dal protocollo pilota di validazione. Il contributo si articola in cinque parti: stato dell'arte, descrizione del sistema, metodologia, risultati preliminari e discussione critica, limiti e sviluppi futuri.

Stato dell'arte: preparazione sismica, giochi formativi immersivi e vincoli dell'interazione uomo-computer | La formazione alla prevenzione sismica attraverso ambienti immersivi è un ambito in rapida evoluzione. Le prime applicazioni di Realtà Virtuale (VR) per l'addestramento all'evacuazione hanno dimostrato la superiore efficacia dei giochi formativi immersivi rispetto ai metodi tradizionali sia nel consolidare l'apprendimento delle procedure sia nel favorire risposte comportamentali più tempestive (Chittaro and Buttussi, 2015; Chittaro and Sioni, 2015). Questa superiorità trova fondamento in due meta-analisi condotte da Sitzmann (2011): la prima, su 65 studi, documenta un apprendimento delle procedure superiore al 14% e dichiarativo all'11% rispetto ai metodi convenzionali, la seconda, su 77 studi, conferma effetti significativi sui processi cognitivi e sulla motivazione intrinseca.

In questa stessa direzione la meta-analisi di Wouters et alii (2013) conferma che i giochi formativi producono effetti positivi sul piano cognitivo e motivazionale, soprattutto quando integrano in modo coerente obiettivi di apprendimento, interazione e feedback. Più recentemente le revisioni sistematiche di Scorgie et alii (2024), Stefan, Mortimer e Horan (2023) e Kaggwa et alii (2025) confermano il consolidarsi della realtà virtuale come strumento di formazione teso alla sicurezza e alla preparazione all'emergenza, evidenziandone il potenziale ma anche la necessità di ulteriori verifiche su costi, accessibilità, sicurezza d'uso e protocolli valutativi più omogenei e comparabili. La revisione di Feng et alii (2018) documenta un corpus crescente di studi che evidenziano il potenziale di questi strumenti nel modificare stabilmente i comportamenti di risposta all'emergenza; il successivo studio degli stessi autori (Feng et alii, 2020) dimostra empiricamente che un ambiente immersivo di gioco formativo in realtà virtuale migliora sia le risposte comportamentali durante il sisma sia la prevenzione post-evento.

Nel campo della prevenzione sismica Li et alii (2017) validano un sistema di addestramento tramite esercitazioni virtuali con miglioramenti significativi nei tempi di risposta; Lovreglio et alii (2018) prototipano un sistema VR per la formazione in edifici ospedalieri; Xu et alii (2019) propongono un metodo di costruzione di scene virtuali di danno sismico per componenti non strutturali interni, finalizzato allo sviluppo di esercitazioni virtuali di sicurezza sismica; Rajabi, Taghaddos e Zahrai (2022) integrano metriche di valutazione dell'ansia introducendo una dimensione psicofisiologica; Lin et alii (2020) indagano le dinamiche di gruppo nell'evacuazione in VR cross-culturale.

In questa stessa direzione le più recenti revisioni della letteratura sull'evacuazione in ambienti interni mostrano come la realtà virtuale assuma un ruolo crescente non solo come ambiente di simulazione, ma anche come dispositivo di progetto e raccolta dati nei contesti di emergenza (Liu and Liu, 2024; Hung, Lin and Hsiao, 2025). I modelli di evacuazione pedonale di Bernardini, Quagliarini e D'Orazio (2016) forniscono la cornice quantitativa per calibrare i parametri di simulazione dell'ILE. Parallelamente applicazioni commerciali come Earthquake Simulator VR[1] documentano una domanda sociale per questo tipo di strumenti e anticipano soluzioni di progettazione dell'interazione poi riprese in contesti formativi strutturati.

Casi di riferimento e buone pratiche | Un confronto sintetico fra alcuni casi internazionali consente di chiarire il posizionamento del presente contributo. I casi qui assunti come riferimento sono stati selezionati secondo quattro criteri: pertinenza rispetto alla preparazione sismica, impiego di tecnologie immersive, presenza di metriche comportamentali o valutative e rilevanza per la costruzione di protocolli formativi replicabili. Un primo caso significativo è quello di Rajabi, Taghaddos e Zahrai (2022), che sviluppano un ambiente immersivo per la formazione alla sicurezza sismica riferito a un'aula scolastica, mettendo a confronto l'istruzione tradizionale con quella mediata dalla realtà virtuale e introducendo una dimensione di valutazione dell'ansia. Il punto di forza del lavoro risiede nella pertinenza al contesto scolastico e nella combinazione tra apprendimento procedurale e indicatori psicofisiologici; il limite principale consiste nella minore attenzione alla relazione tra il dispositivo fisico, lo spazio e il comportamento.

Un secondo caso rilevante è quello di Feng et alii (2020), che propongono un sistema di addestramento immersivo orientato al miglioramento delle risposte comportamentali durante il sisma e della preparazione post-evento. Il punto di forza risiede nella capacità di mettere in relazione l'ambiente immersivo, gli obiettivi di apprendimento e la verifica degli esiti formativi; la criticità dello studio è che l'attenzione si concentra soprattutto sulla simulazione e sul comportamento dell'utente, più che sull'integrazione con un dispositivo fisico progettato come mediatore dell'azione protettiva.

Un terzo caso di utile riferimento è quello di Lovreglio et alii (2018), sviluppato in ambito ospedaliero, che affronta in modo esplicito la prototipazione di un sistema di realtà virtuale per la preparazione sismica. Il contributo è utile per la chiarezza con cui esplicita i componenti di progetto del sistema immersivo e le scelte di rappresentazione dell'evento; al tempo stesso resta riferito a un contesto funzionale diverso da quello scolastico e non mette in relazione l'addestramento immersivo con un sistema di arredo salvavita.

Rispetto a tali esperienze il presente contributo si distingue per il tentativo di connettere in un unico quadro il sistema di arredo LSFS, l'Immersive Learning Environment, il gemello digitale dell'aula e una validazione pilota orientata alla trasferibilità. Questo quadro trova ulteriore conferma nelle più recenti revisioni della letteratura che riconoscono alla realtà virtuale un ruolo crescente nei dispositivi di formazione alla sicurezza e nei processi di preparazione all'emergenza in contesti di evacuazione e gestione del rischio, pur segnalando la necessità di protocolli valutativi più robusti, di confronti più espliciti fra condizioni formative e di misurazioni di lungo periodo sulla tenuta degli apprendimenti (Scorgie et alii, 2024; Stefan, Mortimer and Horan, 2023; Liu and Liu, 2024; Hung, Lin and Hsiao, 2025).

In questa prospettiva i casi esaminati confermano la solidità del campo di ricerca e rendono più leggibile il margine di originalità del presente lavoro sul piano dell'integrazione fra oggetto, infrastruttura digitale e protocollo metodologico.

Il concetto di 'gemello digitale' applicato agli ambienti costruiti ha conosciuto un'evoluzione significativa. D'Amore (2025) propone un'architettura a tre componenti – spazio fisico, controparte virtuale e ponte bidirezionale – come quadro di riferimento per l'integrazione del gemello digitale nel processo edilizio. Wang et alii (2026) mostrano come le più recenti tecnologie digitali per la preparazione all'emergenza negli edifici tendano a configurarsi come ecosistemi integrati, nei quali realtà virtuale, realtà aumentata, BIM, sensori e gemelli digitali cooperano nella costruzione di ambienti più responsivi e orientati alla gestione delle emergenze. La formazione attraverso ambienti ibridi fisico-

digitali trova un quadro teorico nel concetto di apprendimento fisico-digitale (phygital) elaborato da Franzo, Quartu e Tufarelli (2025): il gemello digitale non simula l'oggetto, ma co-produce comportamenti competenti attraverso l'interazione con la sua controparte reale. Giachetta e Buondonno (2024) documentano come gli strumenti immersivi producano effetti cognitivi misurabili e distinti dalla prefigurazione mentale; Vacanti et alii (2025) propongono il concetto di prestazione tecno-temporale per descrivere il progetto del tempo nell'interazione digitale; Zehr Gantz et alii (2025) dimostrano come il disagio di un ambiente costituisca una leva pedagogica intenzionale capace di amplificare l'impatto duraturo dell'esperienza formativa: principio strutturale della simulazione sismica dell'ILE. Il contributo di Davidová, Barath e Dickinson (2023) sulla prototipazione come pratica che integra ricerca e formazione fornisce il fondamento metodologico alla doppia natura del modello ibrido sviluppato in questa ricerca.

Il contributo nel quadro dello stato dell'arte | Dalla letteratura esaminata emergono tre elementi non ancora pienamente integrati. Il primo riguarda il rapporto tra dispositivi fisici di protezione e ambienti immersivi: molti studi analizzano la simulazione dell'evento sismico o la formazione procedurale, ma più raramente tali dimensioni vengono sviluppate a partire da un sistema di arredo progettato per guidare comportamenti protettivi nello spazio scolastico. Il secondo riguarda la scala sistemica dell'innovazione: gli ambienti immersivi sono spesso trattati come strumenti aggiuntivi di addestramento, più che come componenti strutturali di un ecosistema sociotecnico capace di connettere oggetto, spazio, dati e apprendimento. Il terzo riguarda il piano metodologico: le sperimentazioni che combinano prototipo fisico, gemello digitale, interazione in tempo reale e protocolli di valutazione orientati alla trasferibilità risultano ancora limitate.

In questo quadro il contributo esplicita il proprio profilo di originalità su tre piani. Sul piano dell'oggetto il Life Saving Furniture System introduce un sistema di arredo salvavita che integra funzione protettiva, funzione didattica e leggibilità d'uso. Sul piano del sistema l'Immersive Learning Environment è concepito come infrastruttura sociotecnica abilitante, capace di mettere in relazione il banco fisico, il gemello digitale, i contenuti immersivi e i processi di apprendimento. Sul piano metodologico la ricerca sperimenta un ciclo fisico-virtuale-fisico che connette rilievo, modellazione, simulazione, riscontro operativo e restituzione critica in un unico dispositivo di ricerca attraverso il design, come sintetizzato nel workflow di sviluppo iterativo LSFS-ILE (Fig. 2).

Il Life Saving Furniture System | Il Life Saving Furniture System è un sistema di arredo protettivo per gli ambienti scolastici delle aree ad alto rischio sismico dell'Italia centrale. Sviluppato nell'ambito del programma Vitality come risposta alle criticità emerse dopo i terremoti del 2016-2017 in Abruzzo, Lazio, Marche e Umbria, integra le funzioni protettiva, didattica e di presidio ambientale (Pietroni, Mascitti and Galloppo, 2021; Pietroni et alii, 2025).

Il sistema è composto da un insieme coordinato di elementi: il banco protettivo principale (Fig. 3), progettato per resistere al carico da crollo degli elementi non strutturali e per guidare la postura corretta (testa abbassata, braccia a protezione della nuca, corpo raccolto) in conformità alle linee guida internazionali di prevenzione sismica (Centers for Disease Control and Prevention, 2024); elementi complementari di seduta e contenimento; componenti di connessione e segnalazione. Il banco è do-



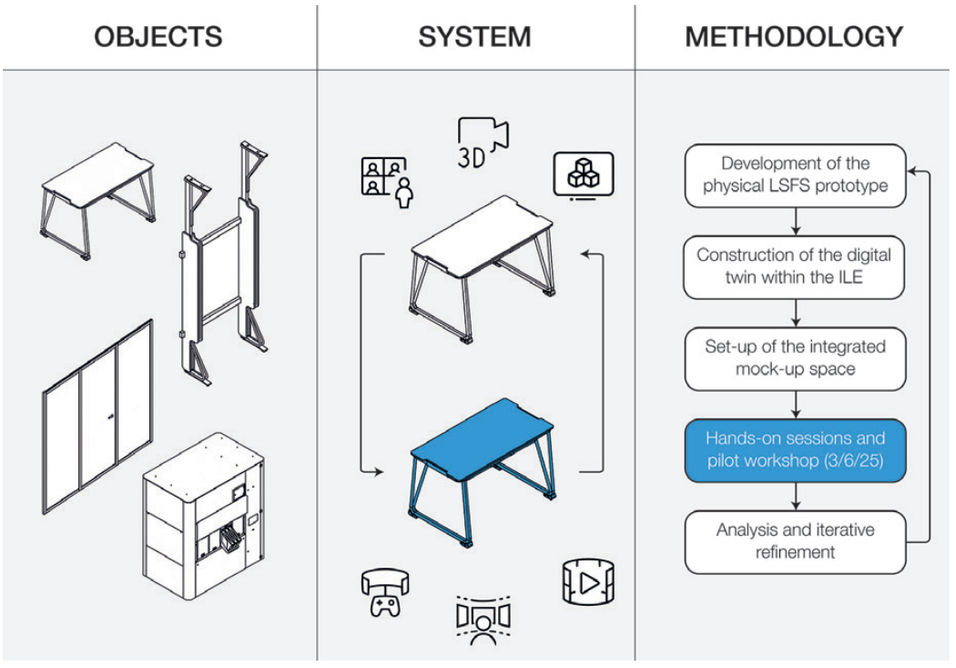


Fig. 1 | Full-scale prototype of the LSFS: overview of desks, coordinated seating, and the reference school interior. (credit: I. Fabbri, 2025).

Fig. 2 | Outline of the LSFS-ILE system articulated across three research planes: the elements of the LSFS, the physical-virtual pedagogical infrastructure of the ILE, and the working methodology (credit: the Authors, 2025).

tato di una sensoristica che, integrata nel gemello digitale, consente il monitoraggio in tempo reale durante la simulazione. La peculiarità progettuale del Life Saving Furniture System consiste nel risolvere una contraddizione strutturale: per essere efficace in un'emergenza il sistema deve essere operabile automaticamente, senza richiedere un processo deliberativo in situazione di pericolo. Questo richiede che la formazione sviluppi una memoria procedurale robusta, non una mera conoscenza dichiarativa: è esattamente per risolvere questa discontinuità che l'ILE è stato progettato. Il Life Saving Furniture System si inserisce in una tradizione di ricerca sul design per la sicurezza collettiva che, come documentato da Valenti et alii (2025), richiede di affrontare simultaneamente le scale dell'oggetto, dell'architettura e del sistema sociale.

Metodologia: ricerca attraverso il design e ciclo fisico-virtuale-fisico | L'ILE adotta un'architettura modulare basata su tre canali integrati, progettati per coprire fasi e modalità d'uso distinte del ciclo di apprendimento, garantendo coerenza geometrica, percettiva e narrativa con il Life Saving Furniture System fisico (Fig. 4).

Il primo canale è il modulo VR per l'esplorazione guidata e la simulazione: questo è il cuore esperienziale dell'ILE, il cui funzionamento si basa sui principi di percezione, interazione e visualizzazione che definiscono l'architettura dei sistemi di realtà virtuale (LaValle, 2023). L'utente esplora in prima persona l'aula ricostruita con il Life Saving Furniture System, comprende il sistema attraverso visualizzazioni diegetiche e viste esplicative ed esegue la simulazione del terremoto con feedback posturale in tempo reale; l'esperienza è strutturata in due livelli, descritti nella sezione dedicata alla progettazione dell'esperienza.

Il secondo canale è costituito dai contenuti 360° per l'introduzione iniziale, le micronarrazioni e il confronto tra reale e virtuale: le fotografie e i video panoramici consentono un accesso graduale all'esperienza, fruibile anche tramite dispositivi tecnologicamente semplici (smartphone con visori a basso costo) senza richiedere la piena immersività della realtà virtuale. Questo canale è particolarmente rilevante per la preparazione pre-sessione e la revisione post-simulazione (Franzo, Quartu and Tufarelli, 2025; Fig. 5).

Il terzo canale è l'estensione Realtà Aumentata (AR) per lo studio della postura in situ e la verifica dell'installazione: l'applicazione AR, utilizzabile su tablet o smartphone in contesti fisici reali, consente di visualizzare sovrapposizioni informative sul banco (indicatori di postura corretta, sequenze procedurali, logica strutturale del sistema) e supporta sessioni collaborative in cui gruppi di studenti o insegnanti lavorano simultaneamente nello spazio fisico (Fig. 6).

A sostegno di tutti e tre i canali un archivio digitale centralizzato, con contenuti digitali e testi aggiornati in modo controllato garantisce la coerenza tra il prototipo fisico e i contenuti digitali: ogni aggiornamento al Life Saving Furniture System si riflette su tutti i canali digitali attraverso un processo di aggiornamento delle risorse digitali (D'Amore, 2025; Peruccio, Liboni and Mucchetti, 2025). L'architettura risponde all'esigenza di superare la dicotomia tra prefigurazione spaziale immersiva e controllo procedurale (Giachetta and Buondonno, 2024), integrando i due poli nel ciclo fisico-virtuale-fisico. L'adozione dello standard ISO/IEC 9234:2025 garantisce la conformità ai requisiti internazionali di interoperabilità e portabilità dei contenuti immersivi (ISO/IEC, 2025), cruciale per la trasferibilità del sistema a contesti scolastici diversi (Valenti et alii, 2025; Canessa and Centanaro, 2024).



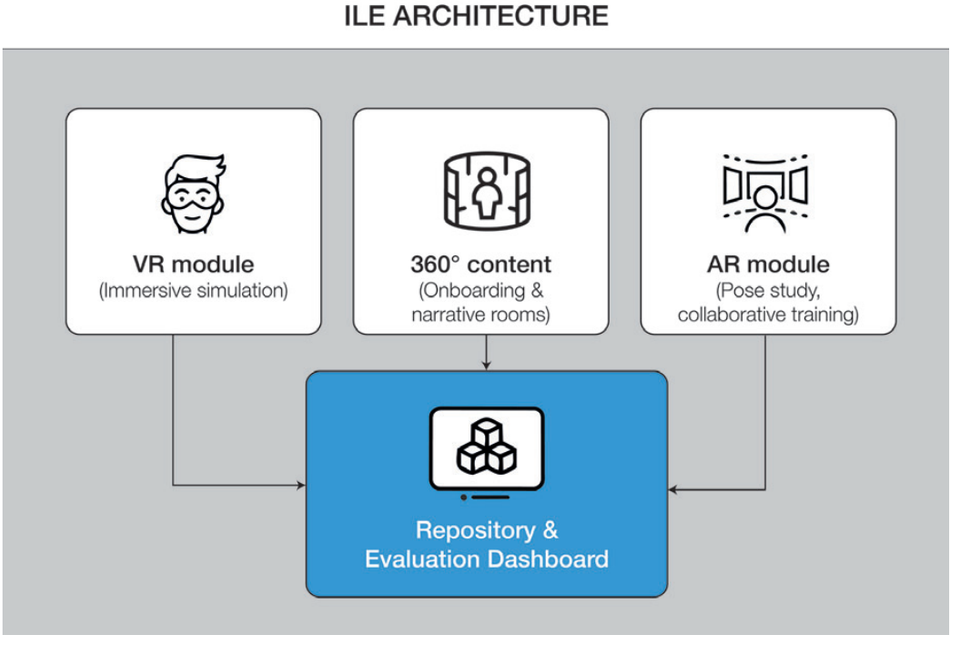


Fig. 3 | Seismic simulation conducted with students from the 'Fermi Sacconi Ceci' Istituto Tecnico Superiore in Ascoli Piceno, Italy (credit: I. Fabbri, 2025).

Fig. 4 | Modular architecture of the ILE ecosystem: the three integrated channels (VR module, 360° content, AR extension) and a centralised storage system with a shared evaluation platform (credit: the Authors, 2025).

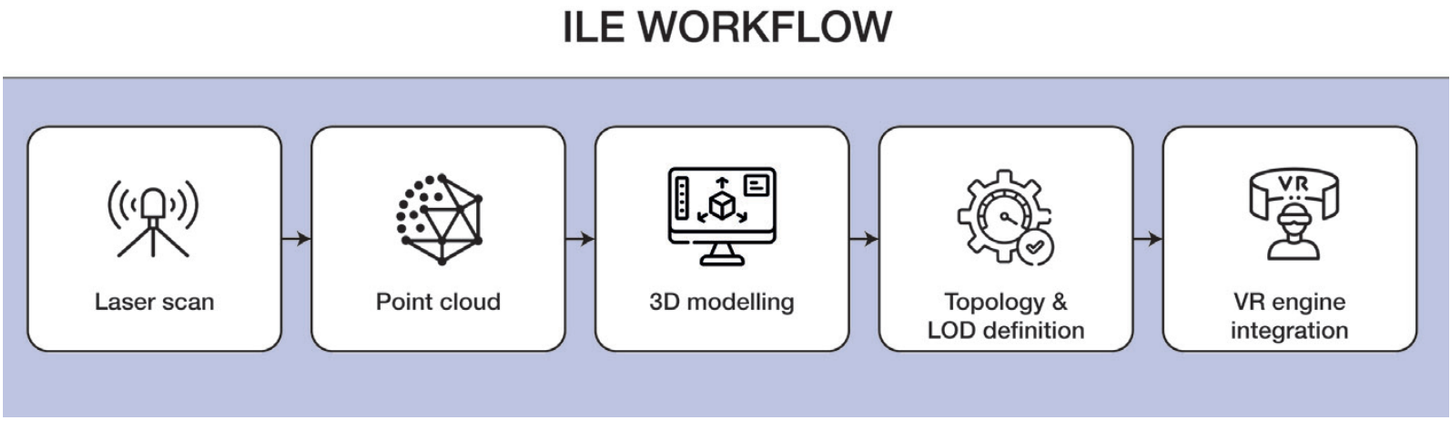


Fig. 5 | Workflow for the survey of the sample classroom: point cloud from the laser scanner, metric plans and sections, and basic three-dimensional processing for the construction of the digital twin (credit: the Authors, 2025).

Architettura dell'ecosistema ILE e costruzione del gemello digitale | Il gemello digitale del sistema aula-LSFS costituisce il pilastro tecnico dell'ILE, il componente che assicura la corrispondenza geometrica, percettiva e funzionale tra l'ambiente fisico di addestramento e quello virtuale di simulazione. Il processo di creazione del gemello digitale segue un flusso in tre fasi.

La prima fase è il rilievo dell'aula, effettuato tramite scansione laser e acquisizione di una nuvola di punti ad alta densità (Fig. 7); in parallelo il Life Saving Furniture System viene acquisito tramite fotogrammetria per produrre un modello percettivamente fedele in VR. La seconda fase è la 'modellazione e ottimizzazione': il modello grezzo viene elaborato per l'uso in tempo reale, riducendo il numero di poligoni e ottimizzando le texture per garantire una frequenza di aggiornamento stabile (Fig. 8). Il mantenimento della coerenza geometrica tra il modello ad alta fedeltà e quello ottimizzato richiede iterazioni successive di verifica visiva e metrica. La terza fase è l'integrazione sensoriale: i sensori integrati nel Life Saving Furniture System fisico vengono collegati al modello virtuale tramite un'architettura di collegamento bidirezionale che consente un riscontro in tempo reale.

Pur non essendo ancora pienamente implementato nell'attuale fase pilota dell'ILE, il flusso di dati in tempo reale tra l'arredo fisico e il modello virtuale è stato concepito come segue: i sensori trasmettono dati di postura e di prossimità a un sistema intermedio di gestione dei dati che li traduce in segnali comprensibili dal motore VR; il gemello digitale aggiorna la visualizzazione della rappresentazione virtuale dell'utente generando riscontri visivi (variazioni cromatiche e indicatori visivi sovrapposti) sulla correttezza della posizione; i dati vengono registrati in un registro temporale utile alla costruzione delle metriche post-sessione. Questo flusso bidirezionale – dal fisico al virtuale per il feedback posturale e dal virtuale al fisico per la modulazione dell'intensità della simulazione – realizza la funzione di ponte bidirezionale nel modello a tre componenti del gemello digitale (D'Amore, 2025).

Il gemello digitale integra anche la simulazione delle condizioni di stress sismico (illuminazione con effetto di sfarfallio, audio spazializzato, vibrazione aptica del banco) che riproducono con realismo controllato l'esperienza percettiva del terremoto. Il concetto di realismo controllato è cruciale: l'obiettivo non è riprodurre il panico, ma generare il livello di attivazione sufficiente a costruire risposte procedurali robuste (Rajabi, Taghaddos and Zahrai, 2022; Hettinger and Riccio, 1992). La tracciabilità dei dati di sessione, gestita attraverso un sistema di registrazione e aggiornamento, risponde anche alle esigenze di certificazione dei percorsi formativi (Peruccio, Liboni and Mucchetti, 2025).

Progettazione dell'esperienza: il Game Design Document | Il progetto esperienziale dell'ILE è formalizzato in un Documento di Progettazione dell'Esperienza che articola la struttura narrativa, le meccaniche di interazione, le regole di progressione e i criteri di valutazione dell'esperienza (Fig. 9). L'esperienza è organizzata in due livelli sequenziali, con un terzo livello di valutazione che attraversa entrambi (Fig. 10).

Il primo livello, denominato Life Saving, ha come obiettivo la comprensione del sistema Life Saving Furniture System: logica strutturale, relazione tra i componenti, zone di protezione e sequenze procedurali corrette. L'utente esplora liberamente l'aula virtuale guidato da visualizzazioni diegetiche ed esplicative (Fig. 11). L'approccio si ispira al concetto di apprendimento trasformativo di Zehr Gantz et alii (2025): l'utente percorre un itinerario di risposta emotiva (curiosità e sorpresa per la funzione non evidente del banco) e riflessione critica che prepara l'azione procedurale del livello successivo, replicando la progressione teorizzata da Mezirow (1997) tra esperienza disorientante, riflessione critica e ridefinizione delle prospettive di significato.

Il secondo livello, denominato Earthquake Simulation, è la simulazione immersiva del terremoto (Fig. 12). La progressione degli stimoli sensoriali – vibrazione del banco fisico, audio spaziale, sfarfallio dell'illuminazione – genera il livello di attivazione necessario per testare la risposta procedurale in condizioni di stress controllato. L'utente deve eseguire la sequenza corretta: avvicinarsi al banco, assumere la postura protettiva, mantenere la posizione per la durata della scossa, eseguire la verifica post-evento. Il principio del 'disagio costruttivo', inteso come attivazione controllata utile alla formazione procedurale (Zehr Gantz et alii, 2025), è strutturale a questo livello: la simulazione genera deliberatamente un disagio cognitivo ed emotivo controllato che attiva risposte comportamentali autentiche (Chittaro and Buttussi, 2015).

Il ciclo di introduzione e restituzione finale, ispirato ai protocolli documentati nella letteratura sui serious game per l'emergenza (Lovreglio et alii, 2018; Feng et alii, 2020), completa la struttura esperienziale. La fase di restituzione finale, con la visualizzazione dei dati di sessione (quali la riproduzione della simulazione, le metriche e il confronto con il valore di riferimento), costituisce la fase chiave in cui si costruisce la riflessione critica sull'esperienza vissuta, consolidando la memoria procedurale e identificando gli ambiti di miglioramento.

Il modello ibrido fisico-digitale | La validazione dell'ILE si avvale di un modello ibrido fisico-digitale che combina un prototipo Life Saving Furniture System a scala reale installato in un'aula scolastica con il corrispondente gemello digitale ricostruito in VR a 360° in scala 1:1, garantendo coerenza geometrica, percettiva e interattiva tra le due dimensioni. La natura del modello sperimentale non è puramente strumentale, ma è, come documentato da Davidová, Barath e Dickinson (2023), un prototipo simultaneamente strumento di ricerca e dispositivo formativo. Questa doppia natura consente di raccogliere dati su dimensioni che una simulazione puramente virtuale non può catturare: la resistenza materiale del banco, le qualità tattili delle superfici, il peso e l'inerzia dei componenti mobili.

Le sessioni prevedono un'interazione alternata tra il Life Saving Furniture System fisico e l'addestramento immersivo in VR; in questa fase pilota il modello ibrido è stato impiegato in un contesto controllato, articolato in tre aree funzionali: area del prototipo fisico LSFS, area di simulazione immersiva con visore e area di introduzione e restituzione finale. Una sessione tipo si articola in: 1) introduzione contestuale, della durata di 10 minuti; 2) esplorazione libera del Life Saving Furniture System fisico senza guida, 5 minuti; 3) livello Life Saving in VR, 5 minuti; 4) ritorno al banco fisico con guida AR, 5 minuti; 5) livello Earthquake Simulation in VR con feedback aptico, 2 minuti; 6) restituzione finale con visualizzazione dei dati, 10 minuti (Fig. 13). In questa fase la finalità della sperimentazione non è ancora la validazione comparativa su larga scala, bensì la verifica della comprensibilità del sistema, della coerenza tra componente fisica e componente di-

gitale e della praticabilità del protocollo di osservazione. L'alternanza fisico-virtuale-fisico costituisce, nell'approccio 'phygital' documentato da Franzo, Quartu e Tufarelli (2025), la struttura ottimale per la costruzione di competenze procedurali ibride che resistono al trasferimento tra contesti.

Protocollo di validazione e metriche | Il protocollo di validazione formulato risponde a tre domande di ricerca: l'ILE migliora le prestazioni comportamentali rispetto alla prevenzione tradizionale? I miglioramenti si mantengono nel tempo (ritenzione a 1 e 3 mesi)? Il profilo di usabilità e comfort è adeguato all'impiego sistematico nelle scuole?

Il protocollo complessivo della ricerca prevede tre condizioni sperimentali e quattro tempi di misurazione; il presente contributo riporta tuttavia la sola fase pilota, finalizzata a verificare la comprensibilità del sistema, la coerenza del modello ibrido e la praticabilità del protocollo di osservazione; tale distinzione è essenziale per interpretare correttamente la portata delle evidenze presentate.

Il protocollo combina metriche quantitative di performance comportamentale con indicatori qualitativi di usabilità e comfort, seguendo un disegno misto pre e post ispirato ai protocolli documentati nella letteratura sui giochi formativi immersivi per l'emergenza (Rajabi, Taghaddos and Zahrai, 2022; Feng et alii, 2020) e ai quadri di valutazione di Zehr Gantz et alii (2025), ma orientato, nella presente fase pilota, alla verifica esplorativa della tenuta del sistema e del protocollo, più che alla misurazione inferenziale di effetti comparativi.

Le metriche comportamentali primarie sono: a) tempo di reazione misurato come intervallo tra l'attivazione dello stimolo sismico e l'inizio del movimento verso il banco; b) correttezza posturale valutata mediante uno score composito su scala 0-100 costruito sulla congruenza tra postura osservata e postura attesa rispetto a tre parametri: protezione del capo e della nuca, raccolta del corpo entro la zona protetta e mantenimento della posizione per la durata richiesta; c) traiettorie intese come coerenza del percorso compiuto rispetto alla configurazione spaziale dell'aula e alla posizione del banco; d) correttezza delle decisioni verificata confrontando la sequenza delle azioni eseguite con la sequenza prevista dal protocollo esperienziale.

Gli indicatori di usabilità e comfort includono la scala di usabilità del sistema (System Usability Scale) adattata per la realtà virtuale, una scala di comfort per la locomozione virtuale, il questionario sul malessere da simulazione (Simulator Sickness Questionnaire) pre e post sessione (Hettinger and Riccio, 1992; Keshavarz, 2016), un questionario sul coinvolgimento e indicatori di presenza somatica, nonché osservazioni guidate e domande aperte finalizzate a rilevare comprensibilità, chiarezza dell'interfaccia, comfort percepito ed eventuali criticità. Tutti gli strumenti sono adattati per fasce d'età diverse (versione adulti / insegnanti e versione studenti). In questa fase pilota il trattamento dei dati combina l'analisi descrittiva degli indicatori quantitativi e la lettura qualitativa, con codifica tematica, delle risposte aperte.

Sono previste tre condizioni sperimentali: 1) formazione tradizionale senza ILE; 2) ILE autonomo; 3) ILE con modello ibrido completo. Le misurazioni si svolgono in quattro tempi: pre-test, post-test immediato e verifica successiva a 1 mese e a 3 mesi, in conformità con le procedure di consenso informato, anonimizzazione dei dati e con la normativa GDPR applicabile.

In questa prima fase le tre condizioni sperimentali costituiscono il quadro di riferimento del protocollo complessivo, mentre la sperimentazione pilota si concentra sulla verifica del sistema ILE con modello ibrido, al fine di testarne l'intelligibilità, la coerenza operativa e il potenziale applicativo. Il campione è composto da 30 studenti del Corso di Disegno Industriale dell'Università di Camerino. Tale scelta, non coincidente con la popolazione scolastica target, risponde a una finalità esplorativa: raccogliere osservazioni qualificate sulla leggibilità del sistema, sull'esperienza d'uso e sui margini di miglioramento dell'interazione. I risultati vanno pertanto interpretati come preliminari e non generalizzabili. La raccolta dei dati è stata impostata in forma non identificativa, mediante l'anonimizzazione delle risposte e la registrazione dei soli indicatori necessari alla valutazione pilota.

Risultati preliminari e discussione | La validazione pilota è stata condotta presso l'ITT Fermi Sacconi Ceci di Ascoli Piceno e presso la Scuola di Ateneo di Architettura e Design 'Eduardo Vittoria' dell'Università di Camerino, con trenta studenti del corso di Disegno Industriale. Il campione pilota non è rappresentativo della popolazione scolastica target: la scelta di studenti universitari di Disegno Industriale è stata motivata dalla loro capacità di fornire feedback qualificati su aspetti della progettazione dell'esperienza; il gemello digitale mira a replicare dimensioni, materiali, colori del prototipo fisico (Fig. 14), mentre il modello integrato è stato configurato con tre zone funzionali: zona prototipo fisico, zona VR con visori immersivi e zona introduttiva.

Il questionario post-sessione ha fornito evidenze su quindici item Likert e cinque domande aperte. La chiarezza delle istruzioni ha ottenuto una media di 4,2/5; l'usabilità dell'interfaccia 4,1/5; le visualizzazioni esplose 4,5/5; la comprensione dell'importanza della postura corretta 4,6/5; mentre l'85% degli studenti non ha riportato sintomi di disagio da immersione, il 15% ha riportato sintomi lievi rapidamente regrediti. I dati automatici del sistema hanno registrato tempi di reazione medi di 4,2 secondi tra l'allerta iniziale e l'inizio del movimento verso il banco, con correttezza posturale durante la fase intensa dell'87% del tempo.

I suggerimenti emersi dalle domande aperte riguardano l'estensione a scenari aggiuntivi, una maggiore articolazione delle dinamiche di gamification, l'introduzione di modalità multiutente e alcuni miglioramenti tecnici relativi all'illuminazione, all'audio e al feedback aptico. La restituzione finale con visualizzazione dei dati è stata percepita dagli utenti come il momento formativo più significativo dell'esperienza, in accordo con i principi dell'apprendimento trasformativo documentati da Zehr Gantz et alii (2025). Tali evidenze devono tuttavia essere lette in chiave preliminare, poiché lo studio pilota consente di verificare la comprensibilità del sistema, la coerenza tra le componenti fisiche e immersive e il potenziale del protocollo, ma non consente ancora di formulare conclusioni generalizzabili sulla sua efficacia comparativa rispetto ai metodi di formazione tradizionali.

Limiti, barriere all'adozione, trasferibilità e scalabilità | Il presente studio presenta evidenti limiti che è necessario riconoscere esplicitamente: il campione pilota è limitato per dimensione ($n < 40$) e geograficamente circoscritto; pertanto, la generalizzabilità richiede studi di replicazione su campioni più ampi e distribuiti. Sul piano tecnico la principale criticità riguarda l'ottimizzazione per dispositivi a bassa soglia tecnologica: il flusso operativo di modellazione è ottimizzato per visori di fascia media (Meta Quest 2/3) e il processo di trasposizione verso smartphone con visori di fascia base introduce inevitabilmente degradazioni percettive che limitano l'efficacia del feedback posturale, traducendosi in una barriera di accesso per le scuole con budget ridotti (D'Amore, 2025; Valenti et alii, 2025).

Le dinamiche sociali e collaborative rimangono insufficientemente sviluppate: la simulazione sismica di gruppo, con dinamiche di panico o di affidamento a una figura guida (Lin et alii, 2020), richiede un'architettura tecnica e narrativa più complessa, attualmente non implementata.

Sul piano della sostenibilità istituzionale la scalabilità del sistema alle scuole richiede affrontare barriere che vanno oltre il design del prodotto: competenze di gestione tecnologica negli Istituti, protocolli di manutenzione degli asset digitali, aggiornamento periodico dei contenuti, gestione della privacy dei dati di sessione degli studenti minorenni. Come documentato da Peruccio, Liboni e Mucchetti (2025) e da Giachetta e Buondonno (2024), le resistenze istituzionali all'adozione di innovazioni tecnologiche nei contesti educativi hanno radici strutturali che nessun prodotto, per quanto ben progettato, può risolvere autonomamente.

In questo senso i risultati qui discussi devono essere interpretati come evidenze esplorative utili a orientare la successiva fase di validazione, non come conferma definitiva dell'efficacia del sistema. La trasferibilità del modello richiederà verifiche su campioni più ampi, fasce d'età differenti, contesti scolastici diversificati e condizioni d'uso meno controllate.

Oltre ai limiti propri della fase pilota l'adozione del sistema in contesti scolastici reali incontra barriere che eccedono il piano strettamente progettuale. Tra queste rientrano il costo e la manutenzione delle dotazioni tecnologiche, la disponibilità di personale formato, l'aggiornamento dei contenuti digitali, la gestione della privacy dei dati di sessione e le procedure di consenso nei casi che coinvolgono studenti minorenni. A tali fattori si aggiungono possibili resistenze culturali e istituzionali nei confronti di dispositivi immersivi, percepiti come complessi o onerosi rispetto alle routine scolastiche consolidate.

La trasferibilità del modello LSFS-ILE dipende da condizioni di validità che devono essere esplicitate. Il sistema appare più facilmente trasferibile in contesti scolastici dotati di una minima infrastruttura digitale e di spazi idonei all'allestimento del prototipo e delle sessioni immersive. La sua trasferibilità varia inoltre in relazione al tipo di scuola, all'età degli utenti, alla disponibilità tecnologica, ai costi di manutenzione, alle competenze del personale e ai requisiti di privacy. Il modello richiede infine adattamenti a diversi contesti sismici, profili di utenza e livelli di risorse economiche e organizzative. In questa prospettiva la scalabilità non va intesa come mera replicazione tecnica, ma come un processo di adattamento guidato da criteri di accessibilità, sostenibilità, privacy e manutenzione; la Tabella 1 sintetizza le principali variabili che incidono sulla trasferibilità del modello LSFS-ILE.

Contributo agli Obiettivi di Sviluppo Sostenibile | Il progetto si colloca all'intersezione di quattro Obiettivi di Sviluppo Sostenibile (SDG), attivando sinergie che ne amplificano l'impatto. Per l'SDG 9 l'ILE è concepito come infrastruttura digitale e non come prodotto, con implicazioni in termini di governance, manutenzione e interoperabilità. L'adozione dello standard ISO/IEC 9234:2025 e l'integrazione tra arredo fisico, gemello digitale e protocollo formativo definiscono un sistema innovativo coerente, replicabile e governabile nel tempo. Per l'SDG 10 il progetto affronta l'accesso alla sicurezza sismica come questione di giustizia spaziale, prevedendo una scalabilità da soluzioni PC VR ad alta fedeltà a dispositivi smartphone con contenuti 360°, così da consentire un accesso graduato anche in contesti con risorse limitate.

Per l'SDG 4 l'ILE democratizza strumenti avanzati di formazione alla sicurezza attraverso un ciclo fisico-virtuale-fisico e una struttura modulare adattabile a diverse fasce d'età, con un protocollo di validazione orientato alla trasferibilità delle evidenze: l'efficacia formativa rafforza l'equità nella capacità di risposta al rischio. Per l'SDG 11 il progetto contribuisce alla resilienza delle comunità scolastiche nelle aree sismiche, estendendo la resilienza dal piano strutturale a quello comportamentale. Il design del Life Saving Furniture System come arredo ordinario integra la sicurezza nell'ambiente di apprendimento, generando effetti moltiplicatori su famiglie e territorio.

In modo indiretto il progetto intercetta anche gli SDG 3 e 13, attraverso la riduzione del rischio e dei suoi impatti sulla salute pubblica, nonché l'SDG 17, per la sua natura collaborativa e interuniversitaria. Il principale compromesso riguarda il rapporto tra ambizione tecnologica e sostenibilità istituzionale: una maggiore sofisticazione implica maggiori esigenze di competenze e risorse, richiedendo politiche di formazione, investimenti pubblici e standard condivisi.

In termini più ampi il contributo attiva effetti diretti soprattutto rispetto agli SDG 4, 9 e 11, mentre il riferimento all'SDG 10 va motivato in relazione all'accessibilità economica dei dispositivi, alla possibilità di adozione in scuole collocate in aree interne o fragili e alla riduzione delle asimmetrie territoriali nell'accesso a strumenti avanzati di formazione alla sicurezza. Rispetto all'insieme degli SDG 1-17 il progetto non produce ricadute uniformi, ma una costellazione selettiva di effetti diretti, indiretti, sinergie e compromessi. Tra le sinergie indirette si possono richiamare il benessere e la salute pubblica, la riduzione del rischio e la cooperazione istituzionale; tra i compromessi emergono invece i costi tecnologici, i requisiti di manutenzione, le esigenze di formazione del personale e le questioni di gestione dei dati. In tal senso la coerenza con gli SDG dichiarati va intesa non in forma astratta, ma come relazione condizionata dalla disponibilità di risorse, competenze, infrastrutture e politiche di accompagnamento.

Discussione critica e direzioni future | Il contributo ha presentato lo sviluppo, l'architettura e la validazione preliminare di un Immersive Learning Environment concepito come infrastruttura digitale sociotecnica a supporto del Life Saving Furniture System. L'interesse principale della ricerca non risiede soltanto nell'impiego di tecnologie immersive per la prevenzione sismica, ma anche nel tentativo di integrare oggetto fisico, spazio, simulazione e apprendimento in un unico dispositivo progettuale e sperimentale. I dati raccolti nello studio pilota suggeriscono che il sistema presenta una buona intelligibilità d'uso, un profilo di usabilità positivo e una promettente capacità di orientare comportamenti procedurali coerenti durante la simulazione. Tali evidenze non autorizzano ancora conclusioni generalizzabili né un confronto pienamente dimostrato con i metodi formativi tradizionali: più che confermare in via definitiva l'ipotesi di ricerca, i risultati ne suggeriscono la plausibilità e la necessità di ulteriori verifiche. La principale novità del contributo non è tecnica ma concettuale e metodologica: il posizionamento dell'ILE come infrastruttura digitale abilitante dell'innovazione, e non come strato formativo aggiuntivo, consente infatti di leggere l'apprendimento immersivo come parte costitutiva dei sistemi di sicurezza complessi.

Sul piano teorico questo spostamento ridefinisce il ruolo dell'apprendimento nel ciclo di vita dei prodotti di sicurezza, mettendo in relazione oggetto, spazio, comportamento e mediazione digitale. Sul piano metodologico la ricerca mostra il potenziale del ciclo fisico-virtuale-fisico come dispositivo capace di connettere prototipazione, riscontro operativo, valutazione e riflessione critica, integrando gemello digitale, gestione dei contenuti e governance dei dati di sessione (D'Amore, 2025; Valenti et alii, 2025). Sul piano applicativo il lavoro apre una prospettiva trasferibile ad altri contesti in cui il design è chiamato a sostenere comportamenti corretti in condizioni di rischio, purché siano chiarite le condizioni organizzative, tecnologiche ed etiche della sua implementazione.

Gli sviluppi futuri si articolano lungo più direttrici convergenti: una prima direzione riguarda l'ampliamento del campione di validazione, il coinvolgimento diretto della popolazione scolastica target e la replicazione in contesti scolastici diversificati per tipologia edilizia, fascia d'età e area geografica; la seconda riguarda lo sviluppo della dimensione collaborativa dell'ILE poiché modalità di simulazione collettiva aprono scenari di ricerca pedagogicamente rilevanti e consentono di osservare più compiutamente le dinamiche interattive fra utenti, ambiente e dispositivo (Davidová, Barath and Dickinson, 2023); la terza riguarda l'integrazione di metriche più robuste, tra cui misure psicofisiologiche nel protocollo di valutazione, al fine di calibrare con maggiore precisione l'intensità dell'esperienza e la qualità delle risposte procedurali (Rajabi, Taghaddos and Zahrai, 2022).

In questa prospettiva il sistema LSFS-ILE può essere considerato non un esito concluso, ma una piattaforma di ricerca aperta, utile a potenziare il dibattito sul rapporto tra design, sicurezza, apprendimento e infrastrutture digitali e a esplorare modelli trasferibili per la trasformazione dei comportamenti in condizioni di emergenza (Franzo, Quartu and Tufarelli, 2025; Valenti et alii, 2025; D'Amore, 2025).

In areas of high seismic risk, school safety depends not only on the structural performance of buildings, but also on occupants' ability to recognise and correctly use protective devices and operational procedures. Technical innovation remains fragile when it is not easily recognised in everyday use and cannot be readily transferred across different contexts and user groups (Pietroni, Mascitti and Galloppo, 2021). The issue is not purely technical. It concerns, on the one hand, the mediation between artefact, body, and space, and on the other, the conditions that enable correct and timely action under controlled stress, in line with studies showing that earthquake behaviour is shaped by situational, perceptual, and contextual factors (Alexander, 1990).

With this in mind, the contribution presents the Life Saving Furniture System (LSFS), a protective furniture system for school environments developed within the Vitality programme (Spoke 6, WP3). The system is intended to guide postures and behaviours during a seismic event through a coordinated set of furniture elements that integrate protective and educational functions (Pietroni, Mascitti and Galloppo, 2021; Pietroni et alii, 2025; Fig. 1). The research hypothesis is that immersive learning, when integrated into the design process, is not to be understood as an additional layer of training, but as a component of the innovation itself, capable of reducing interpretative ambiguity, strengthening procedural memory, and making the relationship between body, furniture, and space legible under conditions of controlled stress. From this perspective, the Immersive Learning Environment (ILE) is not an accessory to the LSFS, but its enabling digital infrastructure, conceived as a system that relates objects, space, content, and learning processes within a framework of increasing digital design complexity (Valenti et alii, 2025; Davidová, Barath and Dickinson, 2023; Nava and Melis, 2024).

In light of these premises, the contribution addresses a twofold research gap: on the one hand, the limited integration between physical protection devices, procedural learning, and digital infrastructure for seismic preparedness; on the other, the lack of experimental protocols capable of coherently connecting the physical object, its digital twin, and behavioural assessment under controlled stress conditions. Accordingly, the contribution proposes an advancement on three levels: at the level of the object, through the Life Saving Furniture System; at the level of the system, through the Immersive Learning Environment, understood not as an accessory support but as a socio-technical learning infrastructure; and at the methodological level, through the physical-virtual-physical cycle, the development of the digital twin, and the pilot validation protocol. The contribution is structured in five parts: state of the art, system description, methodology, preliminary results and critical discussion, and limitations and future developments.

State of the art: seismic preparedness, immersive training games, and constraints of human-computer interaction | Seismic prevention training through immersive environments is a rapidly evolving field. Early applications of Virtual Reality (VR) for evacuation training have shown the greater effectiveness of immersive training games compared to traditional methods, both in consolidating procedural learning and in promoting more timely behavioural responses (Chittaro and Buttussi, 2015; Chittaro and Sioni, 2015). This advantage is supported by two meta-analyses by Sitzmann (2011). The first, based on 65 studies, reports a 14% increase in procedural learning and an 11% increase in declarative learning compared to conventional methods. The second, based on 77 stud-

ies, confirms significant effects on cognitive processes and intrinsic motivation.

In the same vein, the meta-analysis by Wouters et alii (2013) shows that training games produce positive cognitive and motivational effects, particularly when they consistently integrate learning objectives, interaction, and feedback. More recently, systematic reviews by Scorgie et alii (2024), Stefan, Mortimer, and Horan (2023) and Kaggwa et alii (2025) confirm the consolidation of virtual reality as a tool for safety training and emergency preparedness, highlighting its potential but also the need for further verification of cost, accessibility, user safety, and more homogeneous and comparable evaluation protocols. The review by Feng et alii (2018) documents a growing body of studies highlighting the potential of these tools to produce lasting changes in emergency response behaviours; a subsequent study by the same authors (Feng et alii, 2020) empirically demonstrates that an immersive virtual reality training game environment improves both behavioural responses during an earthquake and post-event prevention.

In the field of earthquake prevention, Li et alii (2017) validate a training system using virtual drills with significant improvements in response times; Lovreglio et alii (2018) prototype a VR system for training in hospital buildings; Xu et alii (2019) propose a method of constructing virtual earthquake damage scenes for internal non-structural components aimed at developing virtual earthquake safety drills; Rajabi, Taghaddos, and Zahrai (2022) integrate anxiety assessment metrics by introducing a psychophysiological dimension; Lin et alii (2020) investigate group dynamics in cross-cultural VR evacuation. Similarly, recent literature reviews on indoor evacuation show how virtual reality is taking on an increasing role not only as a simulation environment, but also as a tool for design and data collection in emergency contexts (Liu and Liu, 2024; Hung, Lin and Hsiao, 2025). The pedestrian evacuation models of Bernardini, Quagliarini and D'Orazio (2016) provide the quantitative framework to calibrate the ILE simulation parameters. In parallel, commercial applications such as Earthquake Simulator VR[1] reflect a growing social demand for this type of tool and anticipate interaction design solutions later adopted in more structured training contexts.

Reference cases and good practices | A brief comparison of selected international cases helps clarify the positioning of this contribution. The reference cases under consideration were selected according to four criteria: relevance to seismic preparedness, use of immersive technologies, presence of behavioural or evaluative metrics, and relevance to the development of replicable training protocols. A first significant case is Rajabi, Taghaddos and Zahrai (2022), who develop an immersive environment for earthquake safety training in a classroom, comparing traditional education with virtual reality-mediated education and introducing an anxiety assessment dimension. The work's strength lies in its relevance to the school context and in the integration of procedural learning with psycho-physiological indicators; its main limitation lies in the more limited attention to the relationship between the physical device, space, and behaviour.

Feng et alii (2020), proposing an immersive training system aimed at improving behavioural responses during earthquakes and post-event preparedness, represents a second relevant case. The main advantage lies in the ability to integrate the immersive environment, learning objectives, and the verification of training outcomes; a key limitation is the primary focus on simulation and user behaviour, rather than on integration with a physical device designed as a mediator of protective action.

A third useful reference case is Lovreglio et alii (2018), developed in a hospital setting, which addresses the prototyping of a virtual reality system for seismic preparedness. The contribution is valuable for the clarity with which it defines the design



Fig. 6 | Photo collage of experiments with the AR module: posture studies and reverse engineering of the LSFS bench, including collaborative in-situ sessions (credit: the Authors, 2025).



Fig. 7 | Processing of the point cloud acquired by the Leica BLK360 G1 laser scanner: two screenshots of the Leica Cyclone Register 360 software used to process data from the survey of the sample classroom at the 'Fermi Sacconi Ceci' ITT (credit: the Authors, 2025).

Next page

Fig. 8 | Four views of the Rhinoceros 6 and Blender 2.91.1 software used to build the virtual model of the sample classroom at the 'Fermi Sacconi Ceci' ITT (credit: the Authors, 2025).

components of the immersive system and the representation of the event; at the same time, it remains tied to a non-school context and does not connect immersive training to a life-saving furniture system.

Compared to these experiences, this contribution stands out for its attempt to bring together the LSFS, the Immersive Learning Environment, the digital twin of the classroom, and a pilot validation oriented towards transferability within a single framework. This picture is further confirmed by recent literature reviews, which recognise the growing role of virtual reality in safety training and emergency preparedness in evacuation and risk management contexts, while also pointing to the need for more robust evaluation protocols, clearer comparisons between training conditions, and long-term measurements of learning retention (Scorgie et alii, 2024; Stefan, Mortimer and Horan, 2023; Liu and Liu, 2024; Hung, Lin and Hsiao, 2025).

From this perspective, the cases examined confirm the solidity of the research field and make the originality of the present work more legible in terms of the integration of the object, digital infrastructure, and methodological protocol.

The concept of the 'digital twin' applied to built environments has evolved significantly. D'Amore (2025) proposes a three-component architecture – physical space, virtual counterpart and two-way bridge – as a framework for integrating the digital twin into the building process. Wang et alii (2026) show how recent digital technologies for emergency preparedness in buildings tend to take the form of integrated ecosystems, in which virtual reality, augmented reality, BIM, sensors, and digital twins work together to support more responsive, emergency management-oriented environments.

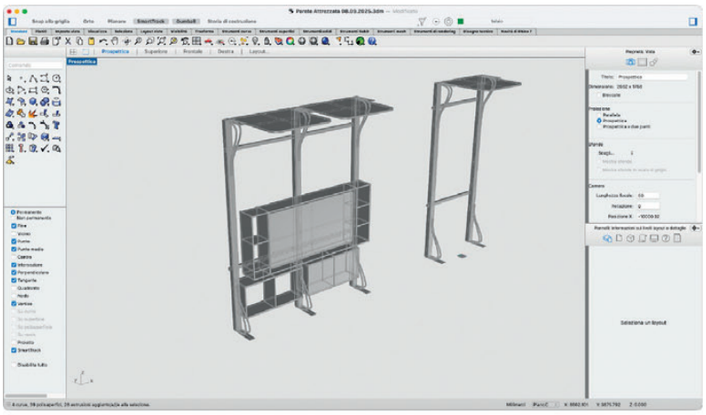
Training through hybrid physical-digital environments finds a theoretical framework in the concept of physical-digital (phygital) learning developed by Franzo, Quartu and Tufarelli (2025): the digital twin does not simply simulate the object, but co-produces competent behaviour through interaction with its real counterpart. Giachetta and Buondonno (2024) document how immersive tools produce measurable cognitive effects distinct from mental prefiguration; Vacanti et alii (2025) propose the concept of techno-temporal performance to describe the design of time in digital interaction; Zehr Gantz et alii (2025) show how environmental discomfort can act as an intentional pedagogical lever, amplifying the lasting impact of the learning experience, a structural principle of the ILE seismic simulation. The contribution by Davidová, Barath, and Dickinson (2023) on prototyping as a practice integrating research and training provides the methodological foundation for the dual nature of the hybrid model developed in this research.

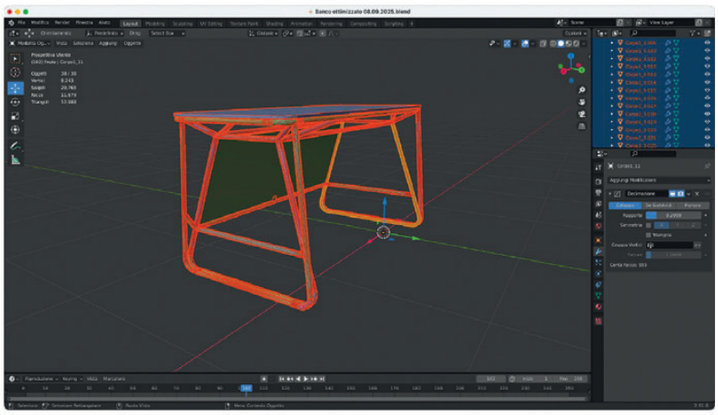
The contribution in the context of the state of the art | Three elements emerge from the examined literature that are not yet fully integrated. The first concerns the relationship between physical protective devices and immersive environments: many studies analyse seismic event simulation or procedural training, but more rarely are these dimensions developed from a furniture system designed to guide protective behaviour within the school space. The second concerns the systemic scale of innovation: immersive environments are often treated as additional training tools, rather than as structural components of a socio-technical ecosystem capable of connecting object, space, data and learning. The third concerns the methodological level: experiments combining physical prototypes, digital twins, real-time interaction, and transferability-oriented evaluation protocols remain limited.

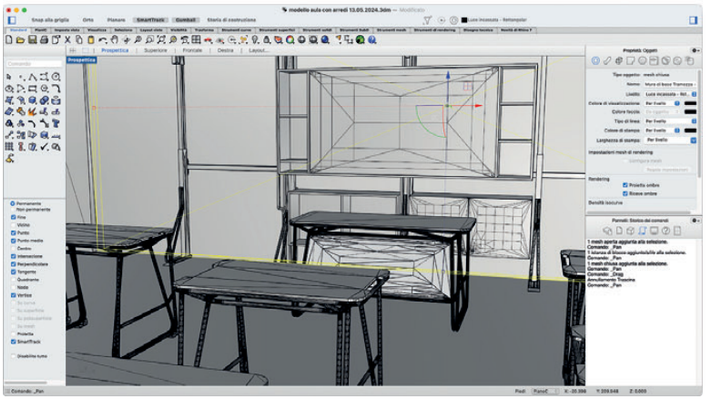
Within this framework, the contribution defines its profile of originality on three levels. At the object level, the Life Saving Furniture System introduces a furniture system that integrates protective, educational, and ease-of-use functions. At the system level, the Immersive Learning Environment is conceived as an enabling socio-technical infrastructure, capable of linking the physical counterpart, its digital twin, immersive content, and learning processes. Methodologically, the research experiments with a physical-virtual-physical cycle that connects survey, modelling, simulation, operational feedback, and critical reflection within a single research-through-design framework, as summarised in the LSFS-ILE iterative development workflow (Fig. 2).

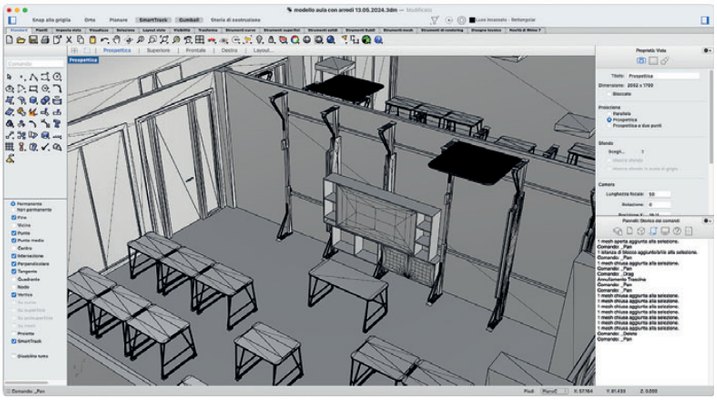
The Life Saving Furniture System | The Life Saving Furniture System is a protective furniture system for school environments in areas of high seismic risk in central Italy. Developed as part of the Vitality programme in response to the critical issues that emerged after the 2016-2017 earthquakes in Abruzzo, Lazio, Marche, and Umbria, it integrates protective, educational, and environmental functions (Pietroni, Mascitti and Galloppo, 2021; Pietroni et alii, 2025).

The system consists of a coordinated set of elements: the main protective desk (Fig. 3), designed to withstand the collapse load of non-structural elements and to guide correct posture (head down, arms protecting the nape of the neck, body tucked in) in accordance with international earthquake









prevention guidelines (Centers for Disease Control and Prevention, 2024); complementary seating and restraint elements; and connection and signalling components. The desk is equipped with sensors that, integrated into the digital twin, allow real-time monitoring during simulation.

The design peculiarity of the Life Saving Furniture System lies in resolving a structural contradiction: to be effective in an emergency, the system must be operable automatically, without requiring a deliberative process in a dangerous situation. This requires that training develop robust procedural memory rather than mere declarative knowledge: it is precisely to resolve this discontinuity that the ILE was designed. The Life Saving Furniture System is part of a tradition of research on design for collective security which, as documented by Valenti et alii (2025), requires addressing the scales of the object, architecture, and social system simultaneously.

Methodology: research through design and physical-virtual-physical cycle | The ILE adopts a modular architecture based on three integrated channels, designed to cover distinct phases and modes of use within the learning cycle, ensuring geometric, perceptual, and narrative coherence with the physical Life Saving Furniture System (Fig. 4). The first channel is the VR module for guided exploration and simulation. This is the experiential core of the ILE, whose operation is based on the principles of perception, interaction, and visualisation that define the architecture of virtual reality systems (LaValle, 2023). The user explores the reconstructed classroom in first person with the Life Saving Furniture System, understands the system through diegetic visualisations and explanatory views, and performs the earthquake simulation with real-time postural feedback. The experience is structured in two levels, described in the experience design section.

The second channel is the 360° content for the initial introduction, micro-narratives and the comparison between real and virtual. Panoramic photographs and videos provide gradual access to the experience, which can also be enjoyed on simple devices (smartphones with low-cost visors), without requiring the full immersion of virtual reality. This channel is particularly relevant for pre-session preparation and post-simulation review (Franzo, Quartu and Tufarelli, 2025; Fig. 5).

The third channel is the Augmented Reality (AR) extension for in-situ posture study and installation verification. The AR application, which can be used on tablets or smartphones in real physical contexts, enables the visualisation of information overlays on the desk (indicators of correct posture, procedural sequences, structural logic of the system) and supports collaborative sessions in which groups of students or teachers work simultaneously in physical space (Fig. 6).

In support of all three channels, a centralised digital archive of content and texts, updated in a controlled manner, ensures consistency between the physical prototype and the digital content: each update to the Life Saving Furniture System is reflected across all digital channels through a process of updating digital resources (D'Amore, 2025; Peruccio, Liboni and Mucchetti, 2025). The architecture responds to the need to overcome the dichotomy between immersive spatial prefiguration and procedural control (Giachetta and Buondonno, 2024), integrating the two within the physical-virtual-physical cycle. The adoption of the ISO/IEC 9234:2025 standard ensures compliance with international requirements for the interoperability and portability of immersive content (ISO/IEC, 2025), which is essential for the transferability of the system to different school contexts (Valenti et alii, 2025; Canessa and Centanaro, 2024).

Architecture of the ILE ecosystem and construction of the digital twin | The digital twin of the classroom-LSFS system constitutes the technical pillar of the ILE, ensuring geometric, perceptual, and functional correspondence between the physical training environment and the virtual simulation environment. The process of creating the digital twin follows a three-step workflow. The first phase is the survey of the classroom, carried out through laser scanning and the acquisition of a high-density point cloud (Fig. 7); in parallel, the Life Saving Furniture System is captured through photogrammetry to produce a perceptually faithful model for VR. The second phase is 'modelling and optimisation': the raw model is processed for real-time use, reducing the number of polygons and optimising textures to ensure a stable refresh rate (Fig. 8). Maintaining geometric consistency between the high-fidelity model and the optimised model requires successive iterations of visual and metric verification. The third stage is sensory integration: the sensors integrated into the physical Life Saving Furniture System are connected to the virtual model via a two-way link architecture, allowing real-time feedback.

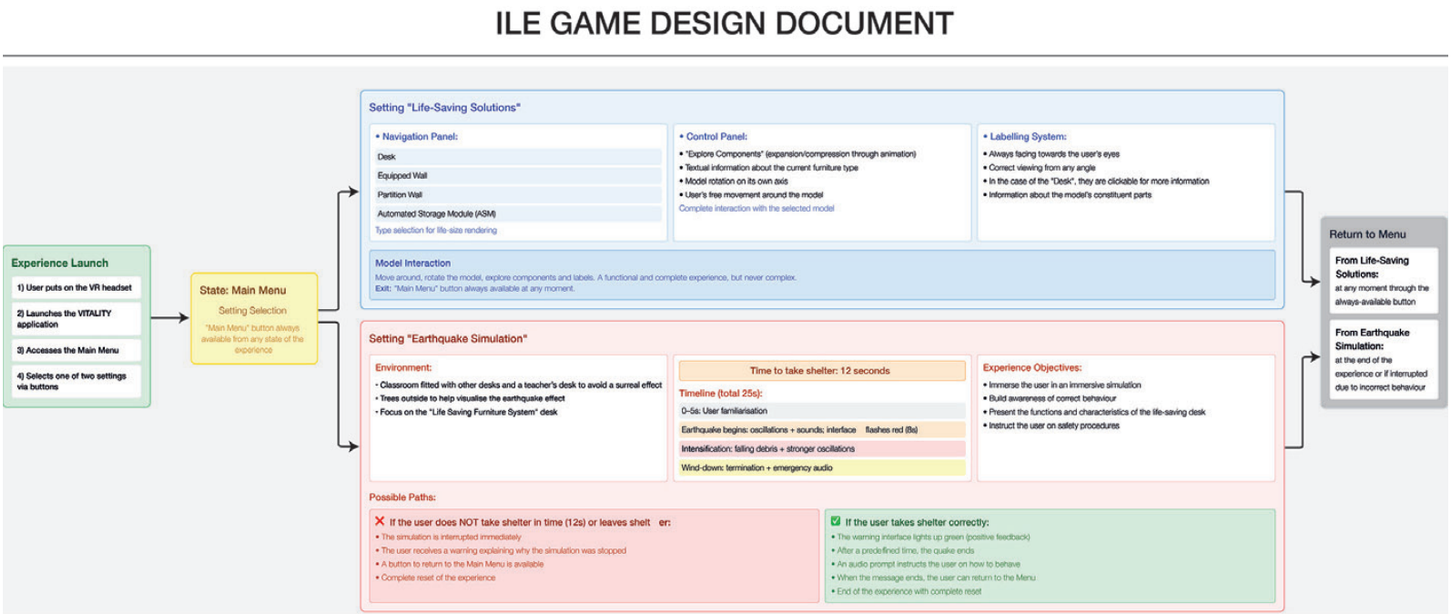
Although not yet fully implemented in the current pilot phase of the ILE, the real-time data flow between the physical furniture and the virtual model is designed as follows: sensors transmit posture and proximity data to an intermediate data man-

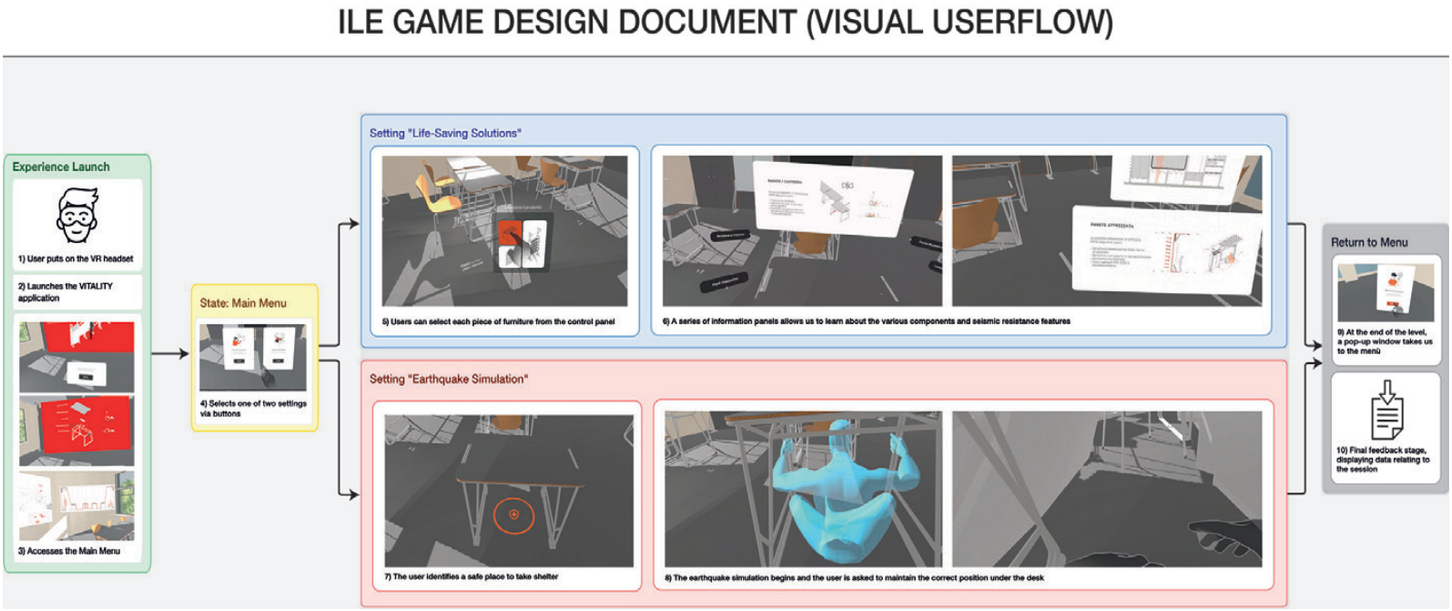
agement system that translates them into signals readable by the VR engine; the digital twin updates the visualisation of the user's virtual representation by generating visual feedback (colour variations and overlapping visual indicators) on the correctness of the position; data are recorded in a time log for the construction of post-session metrics. This two-way flow, from the physical to the virtual for postural feedback and from the virtual to the physical for simulation intensity modulation, enables the bridging function in the three-component model of the digital twin (D'Amore, 2025).

The digital twin also integrates the simulation of seismic stress conditions (flickering lighting, spatialised audio, haptic vibration of the desk) that reproduce the perceptual experience of an earthquake with controlled realism. The concept of controlled realism is central: the goal is not to reproduce panic, but to generate a level of activation sufficient to support robust procedural responses (Rajabi, Taghaddos and Zahrai, 2022; Hettinger and Riccio, 1992). The traceability of session data, managed through a recording and updating system, also meets the requirements for the certification of training courses (Peruccio, Liboni and Mucchetti, 2025).

Experience design: the Game Design Document | The ILE experiential design is formalised in an Experience Design Document that articulates the narrative structure, interaction mechanics, progression rules and evaluation criteria of the experience (Fig. 9). The experience is organised in two sequential levels, with a third level of evaluation running through both (Fig. 10).

The first level, called Life Saving, aims at understanding the Life Saving Furniture System: structural logic, relationship between components, protection zones and correct procedural sequences. The user freely explores the virtual classroom guided by diegetic and explanatory displays (Fig. 11). The approach is inspired by the concept of transformative learning proposed by Zehr Gantz et alii (2025): the user moves through an itinerary of emotional response (curiosity and surprise at the non-obvious function of the desk) and critical reflection that prepares the procedural action of the next level, replicating the progression theorised by Mezirow (1997) between disorienting experience, critical reflection, and the redefinition of meaning perspectives. The second level, called Earthquake Simulation, is the immersive earthquake simulation (Fig. 12). The progression of sensory stimuli (vibration of the physical desk, spatial audio, flickering lighting) generates the level of activation required to test procedural responses under controlled stress conditions. The user must perform the correct sequence: approach the desk, assume the protective posture, maintain the position for the duration of the shock, and perform the post-event





check. The principle of 'constructive discomfort', understood as controlled activation useful for procedural training (Zehr Gantz et alii, 2025), is structural at this level: the simulation deliberately generates controlled cognitive and emotional discomfort that activates authentic behavioural responses (Chittaro and Buttussi, 2015).

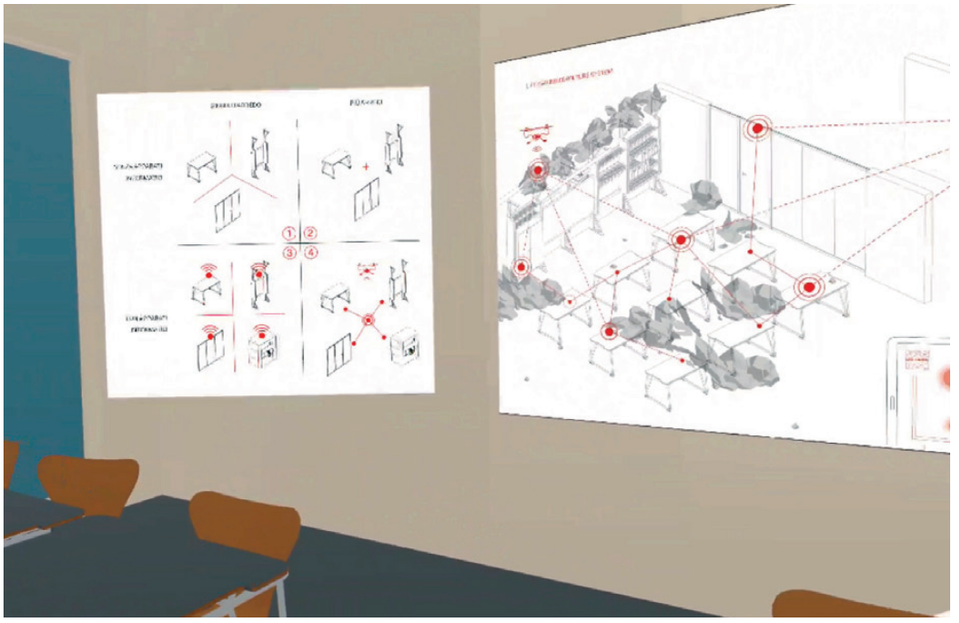
The cycle of introduction and debriefing, inspired by protocols documented in the emergency serious game literature (Lovreglio et alii, 2018; Feng et alii, 2020), completes the experiential structure. The debriefing phase, with the visualisation of session data (such as simulation playback, metrics, and comparison with the baseline), is the stage in which critical reflection on the lived experience is developed, consolidating procedural memory and identifying areas for improvement.

The hybrid physical-digital model | The validation of the ILE makes use of a hybrid physical–digital model that combines a full-scale Life Saving Furniture System prototype installed in a classroom with its corresponding digital twin reconstructed in VR at 360° on a 1:1 scale, ensuring geometric, perceptual, and interactive coherence between the two dimensions. The nature of the experimental model is not purely instrumental, but is, as documented by Davidová, Barath, and Dickinson (2023), a prototype that is simultaneously a research tool and a training device. This dual nature enables the collection of data on dimensions that a purely virtual simulation cannot capture: the material strength of the desk, the tactile qualities of its surfaces, and the weight and inertia of moving components.

The sessions involve alternating between interaction with the physical Life Saving Furniture System and immersive VR training. In this pilot phase, the hybrid model was used in a controlled context, divided into three functional areas: the LSFS physical prototype area, the immersive simulation area equipped with a VR headset, and the introduction and debriefing area. A typical session consists of: 1) contextual introduction, lasting 10 minutes; 2) free exploration of the physical Life Saving Furniture System without guidance, 5 minutes; 3) Life Saving level in VR, 5 minutes; 4) return to the physical desk with AR guidance, 5 minutes; 5) Earthquake Simulation level in VR with haptic feedback, 2 minutes; 6) debriefing with data visualisation, 10 minutes (Fig. 13). At this stage, the purpose of the experimentation is not large-scale comparative validation, but rather the verification of system comprehensibility, of the coherence between physical and digital components, and of the practicability of the observation protocol. The physical–virtual–physical alternation constitutes, in the 'phygital' approach documented by Franzo, Quartu, and Tufarelli (2025), an effective structure for the development of hybrid procedural competences that transfer across contexts.

Validation protocol and metrics | The formulated validation protocol addresses three research questions: does ILE improve behavioural performance compared to traditional prevention? Are the improvements maintained over time (retention at 1 and 3 months)? Is the usability and comfort profile adequate for systematic use in schools? The overall research protocol includes three experimental conditions and four measurement points; however, this contribution reports only on the pilot phase, aimed at verifying system comprehensibility, the consistency of the hybrid model, and the practicability of the observation protocol. This distinction is essential for correctly interpreting the scope of the evidence presented.

The protocol combines quantitative metrics of behavioural performance with qualitative indicators of usability and comfort, following a mixed pre and post-design inspired by protocols documented in the literature on immersive training environments for emergency contexts (Rajabi, Taghaddos and Zahrai, 2022; Feng et alii, 2020) and by the evaluation frameworks of Zehr Gantz et alii (2025), but oriented, in the present pilot phase, towards ex-



Previous page

Fig. 9 | Flow diagram of the ILE VR 2.0 user experience: a synoptic table outlining scenarios, navigation mechanics, learning objectives, and the timeline of the seismic simulation (credit: the Authors, 2025).

Fig. 10 | Visual diagram of the ILE VR 2.0 user experience flow (credit: the Authors, 2025).

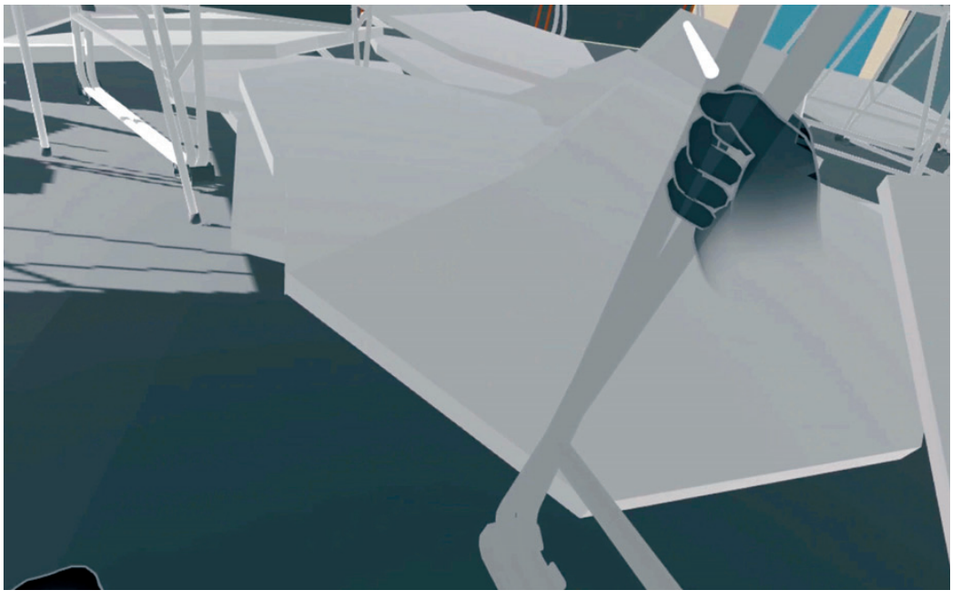


Fig. 11 | View extracted from Level 1 – Life-saving ILE: diegetic information panels on the LSFS integrated into the virtual classroom (credit: the Authors, 2025).

Fig. 12 | View of Level 2 – Earthquake Simulation in the ILE: the user adopts a protective posture beneath the LSFS bench during the seismic event, with dynamic non-structural elements and flickering illumination (credit: the Authors, 2025).



Previous page

Fig. 13 | Progression of the seismic simulation scenario within the ILE: the three views show successive states of non-structural damage, each rendered in dual viewing modes: first-person immersive and third-person observational perspectives (credit: the Authors, 2025).

Fig. 14 | Comparison between the real environment and its virtual counterpart within the ILE: the two juxtaposed views show the sample classroom and its digital replica from a similar perspective (credit: the Authors, 2025).

Variable	Relevance	Main issues	Adaptation requirements
School type	High	Differences in spatial layout, furniture, school routines, and users' level of autonomy	Adaptation of protocol, contents, and degree of guidance
Users' age	High	Cognitive, motor, and attentional differences; different ability to understand and maintain procedures and protective postures	Calibration of language, session duration, interaction complexity, and stimulus intensity
Technological availability	High	Uneven hardware provision, lack of immersive devices, different device quality, and infrastructural limitations	Scalable system configuration, from full immersive solutions to 360° contents and low-threshold devices
Maintenance cost	Medium-High	Updating digital contents, device maintenance, technical assistance, and replacement of components	Scheduled maintenance cycles, standardized updates, and sustainable management models
Staff skills	High	Limited familiarity with immersive environments, training procedures, and data management	Dedicated training for teachers and technical staff, operational guidelines, and simplified protocols
Privacy requirements	High	Session data processing, involvement of minors, informed consent, and data storage and access	Data minimization, anonymization, consent procedures, and clear data governance
Seismic context	Medium-High	Differences in risk level, prevention practices, and local perception of emergency	Customization of scenarios, procedures, and simulation intensity according to the territorial context

Tab. 1 | Variables affecting the transferability and scalability of the LSFS-ILE model (credit: the Authors, 2025).

ploratory verification of system and protocol robustness rather than the inferential measurement of comparative effects. The primary behavioural metrics are: a) reaction time, measured as the interval between the activation of the seismic stimulus and the start of movement towards the desk; b) postural correctness, assessed through a composite score on a 0-100 scale based on the congruence between observed and expected posture with respect to three parameters: protection of the head and nape of the neck, positioning of the body within the protected area, and maintenance of the posture for the required duration; c) trajectories, understood as the coherence of the path taken in relation to the spatial configuration of the classroom and the position of the desk; d) correctness of decisions, verified by comparing the sequence of actions performed with that envisaged by the experiential protocol.

The usability and comfort indicators include the System Usability Scale adapted for virtual reality, a comfort scale for virtual locomotion, the pre and post-session Simulator Sickness Questionnaire (Hettinger and Riccio, 1992; Keshavarz, 2016), an engagement questionnaire, and somatic presence indicators, as well as guided observations and open-ended questions aimed at assessing comprehensibility, interface clarity, perceived comfort, and any critical issues. All tools are adapted for different age groups (adult / teacher version and student version). In this pilot phase, data processing combines descriptive analysis of quantitative indicators and qualitative reading, with thematic coding, of open-ended responses. Three experimental conditions are envisaged: 1) traditional training without the ILE; 2) autonomous ILE; 3) ILE with the full hybrid model. Measurements are carried out at four stages: pre-test, immediate post-test, and follow-up tests at 1 month and 3 months, in accordance with informed consent procedures, data anonymisation, and applicable GDPR regulations.

In this first phase, the three experimental conditions define the overall protocol, while the pilot experiment focuses on testing the ILE system with a hybrid model in order to assess its intelligibility, operational consistency, and application potential. The sample consists of 30 students from the Industrial Design course at the University of Camerino (Italy). This choice, which does not coincide with the target school population, serves an exploratory purpose: to gather informed observations on system readability, user experience, and opportunities to improve interaction. The results should therefore be interpreted as preliminary and not generalisable. Data collection was set up in a non-identifying manner by anonymising responses and recording only the indicators necessary for the pilot evaluation.

Preliminary results and discussion | The pilot validation was conducted at the ITT Fermi Sacconi Ceci in Ascoli Piceno and at the University of Camerino's 'Eduardo Vittoria' School of Architecture and Design, with thirty students from the Industrial Design course. The pilot sample is not representative of the target school population: the choice of university students of Industrial Design was motivated by their ability to provide informed feedback on aspects of experience design; the digital twin aims to replicate the dimensions, materials, and colours of the physical prototype (Fig. 14), while the integrated model was configured with three functional zones: physical prototype zone, VR zone with immersive headsets, and introductory zone.

The post-session questionnaire provided evidence on fifteen Likert items and five open-ended questions. Clarity of instructions scored an average of 4.2/5; interface usability 4.1/5; exploded views 4.5/5; understanding of the importance of correct posture 4.6/5; while 85% of students reported no symptoms of immersion discomfort, 15% reported mild symptoms that quickly regressed. The system's automatic data recording showed average reaction times of 4.2 seconds between the initial alert and the start of movement towards the desk, with correct posture maintained during the intense phase for 87% of the simulation time.

Suggestions that emerged from the open-ended questions concerned the extension to additional scenarios, a greater articulation of gamification dynamics, the introduction of multi-user modes, and some technical improvements related to lighting, audio and haptic feedback. The final debriefing, coupled with data visualisation, was perceived by users as the most significant learning moment of the experience, in line with the principles of transformative learning documented by Zehr Gantz et alii (2025). However, this evidence should be interpreted as preliminary, as the pilot study allows verification of system comprehensibility, coherence between the physical and immersive components, and the potential of the protocol, but does not yet support generalisable conclusions on its comparative effectiveness with respect to traditional training methods.

Limitations, barriers to adoption, transferability and scalability | This study has evident limitations that need to be explicitly recognised. The pilot sample is limited in size ($n < 40$) and geographically circumscribed; therefore, generalisability requires replication studies with larger, more widely distributed samples. On the technical side, the main critical issue concerns optimisation for devices with a low technological threshold: the modelling workflow is optimised for mid-range headsets (Meta Quest 2/3), and the process of transposition to smartphones with low-cost headsets inevitably introduces perceptual degradation that limits the effectiveness of postural feedback, resulting in an access barrier for schools with limited budgets (D'Amore, 2025; Valenti et alii, 2025).

Social and collaborative dynamics remain underdeveloped: group seismic simulation, including dynamics of panic or reliance on a guiding figure (Lin et alii, 2020), requires a more complex technical and narrative architecture, currently not implemented. In terms of institutional sustainability, scaling the system to schools requires addressing barriers that go beyond product design: technology management skills within institutions, maintenance protocols for digital assets, periodic updating of content, and the management of session data privacy for underage students. As documented by Peruccio, Liboni, and Mucchetti (2025) and Giachetta and Buondonno (2024), institutional resistance to the adoption of technological innovations in educational contexts has structural roots that no product, no matter how well designed, can resolve on its own.

In this sense, the results discussed here must be interpreted as exploratory evidence useful to guide the subsequent validation phase, not as definitive confirmation of the effectiveness of the system. Transferability of the model will require testing on larger samples, different age groups, diverse school contexts and less controlled conditions of use. In addition to the inherent limitations of the pilot phase, the adoption of the system in real school contexts encounters barriers that extend beyond the design itself. These include the cost and maintenance of technological equipment, the availability of trained staff, the updating of digital content, the management of session data privacy, and consent procedures in cases involving underage students. These factors are compounded by possible cultural and institutional resistance to immersive devices, perceived as complex or burdensome in relation to established school routines.

The transferability of the LSFS-ILE model depends on validity conditions that must be made explicit. The system appears to be more readily transferable to school contexts with at least a minimal digital infrastructure and suitable spaces for setting up the prototype and immersive sessions. Its transferability also varies according to the type of school, age of users, technological availability, maintenance costs, staff skills and privacy requirements. Finally, the model requires adaptations to different seismic contexts, user profiles and levels of economic and organisational resources. From this perspective, scalability should not be understood as mere technical replication, but as a process of adaptation guided by criteria of accessibility, sustainability, privacy and maintenance. Table 1 summarises the main variables affecting the transferability of the LSFS-ILE model.

Contribution to the Sustainable Development Goals | The project operates at the intersection of four Sustainable Development Goals (SDGs), activating synergies that amplify their impact. For SDG 9, the ILE is conceived as a digital infrastructure rather than a product, with implications for governance, maintenance, and interoperability. The adoption of the ISO/IEC 9234:2025 standard and the integration of physical furniture, digital twin and training protocol define a coherent, replicable and governable innovative system. For SDG 10, the project addresses access to seismic safety as a matter of spatial justice, providing scalability from high-fidelity PC VR solutions to smartphone devices with 360° content, in order to enable graduated access even in resource-limited contexts. For SDG 4, the ILE democratises safety training tools through a physical-virtual-physical cycle and a modular structure adaptable to different age groups, with a validation protocol geared towards transferability of evidence. Training effectiveness strengthens equity in risk response. For SDG 11, the project contributes to the resilience of school communities in earthquake-prone areas by extending resilience from the structural to the behavioural level. The design of the Life Saving Furniture System as ordinary furniture integrates safety into the learning environment, generating multiplier effects on families and the local area.

In an indirect way, the project also intercepts SDGs 3 and 13, through the reduction of risk and its impacts on public health, as well as SDG 17, due to its collaborative and inter-university nature. The main trade-off concerns the relationship between technological ambition and institutional sustainability: greater sophistication implies greater demands on skills and resources, requiring training policies, public investment and shared standards.

In broader terms, the contribution activates direct effects mainly with respect to SDGs 4, 9 and 11, while the reference to SDG 10 must be motivated in relation to the affordability of the devices, the possibility of adoption in schools located in inland or fragile areas and the reduction of territorial asymmetries in access to advanced safety training tools. With respect to SDGs 1-17 as a whole, the project does not produce uniform impacts, but rather a selective constellation of direct and indirect effects, synergies, and trade-offs. Indirect synergies include public welfare and health, risk reduction and institutional cooperation; trade-offs include technology costs, maintenance requirements, staff training needs and data management issues. In this sense, consistency with the declared SDGs is to be understood not in an abstract form, but as a relationship conditioned by the availability of resources, skills, infrastructure and accompanying policies.

Critical discussion and future directions | The contribution presents the development, architecture, and preliminary validation of an Immersive Learning Environment designed as a digital socio-technical infrastructure to support the Life Saving Furniture System. The research's main interest lies not only in the use of immersive technologies for seismic prevention, but also in the attempt to integrate physical objects, space, simulation, and learning within a single design and experimental device. The data collected in the pilot study suggest that the system shows good comprehensibility in use, a positive usability profile and a promising ability to guide consistent procedural behaviour during simulation. Such evidence does not yet warrant generalisable conclusions nor a fully demonstrated comparison with traditional training methods: rather than definitively confirming the research hypothesis, the results suggest its plausibility and the need for further verification.

The main novelty of the contribution is not technical but conceptual and methodological: the positioning of ILE as an enabling digital infrastructure of innovation, and not as an additional training layer, allows immersive learning to be read as a constitutive part of complex security systems.

On a theoretical level, this shift redefines the role of learning in the life cycle of security products, relating object, space, behaviour and digital mediation. Methodologically, the research shows the potential of the physical-virtual-physical cycle as a device capable of connecting prototyping, operational feedback, evaluation, and critical reflection, integrating the digital twin, content management, and session data governance (D'Amore, 2025; Valenti et alii, 2025). In terms of application, the work opens up a perspective that can be transferred to other contexts in which design is called upon to support correct behaviour in risky conditions, provided that the organisational, technological and ethical conditions of its implementation are clarified.

Future developments follow several converging lines. A first direction concerns expanding the validation sample, the direct involvement of the target school population, and replication in school contexts diversified by building type, age group, and geographical area. The second relates to the development of the collaborative dimension of the ILE, as collective simulation modes open up pedagogically relevant research scenarios and make it possible to observe more fully the interactive dynamics between users, environment, and device (Davidová, Barath and Dickinson, 2023). The third concerns the integration of more robust metrics, including psychophysiological measures in the evaluation protocol, to more precisely calibrate the intensity of the experience and the quality of procedural responses (Rajabi, Taghaddos and Zahrai, 2022).

From this perspective, the LSFS-ILE system can be considered not as a concluded outcome, but as an open research platform, useful for advancing the debate on the relationship between design, security, learning, and digital infrastructures and for exploring transferable models for transforming behaviour under emergency conditions (Franzo, Quartu and Tufarelli, 2025; Valenti et alii, 2025; D'Amore, 2025).

Acknowledgements

The contribution is part of the research programme 'VITALITY – Innovation, digitalisation and sustainability for the diffused economy in Central Italy – Ecosystems of Innovation Marche-Umbria-Abruzzo', financed with NextGenerationEU funds of the European Union under the PNRR, Mission 4 'Education and Research'. The grant relates to Spoke 6, WP3 'Sustainable design of smart furniture system with life-saving function in conditions of emergency for community settings', Grant ECS00000041 – VITALITY – CUP J13C 22000430001 – Project number ARS01_00914, year 2023-2025. Pilot testing was conducted at the University of Camerino's School of Architecture and Design, Sant'Angelo Magno, Ascoli Piceno, and at the 'Fermi-Sacconi-Ceci' Higher Education Institute (ITT) in Ascoli Piceno.

The research phase reported here has been completed and was developed by a working group in which F. O. Oppedisano coordinated the scientific setup of the contribution and the immersive environment design; D. Rossi contributed to the definition of the methodological framework, the survey and the construction of the digital twin; M. Scortichini contributed to the design of the experience and to the collection and interpretation of preliminary data.

Data collection activities were carried out in a non-identifying form and with information and consent procedures consistent with the exploratory nature of the trial. The Authors declare that there are no conflicts of interest.

Note

1) For more information, see: store.steampowered.com/app/607590/Earthquake_Simulator_VR/ [Accessed 26 March 2026].

References

Alexander, D. (1990), "Behavior during earthquakes – A Southern Italian example", in *International Journal of Mass*

Emergencies and Disasters, vol. 8, issue 1, pp. 5-29. [Online] Available at: doi.org/10.1177/028072709000800102 [Accessed 26 March 2026].

Bernardini, G., Quagliarini, E. and D'Orazio, M. (2016), "Towards creating a combined database for earthquake pedestrians' evacuation models", in *Safety Science*, vol. 82, pp. 77-94. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.ssci.2015.09.001 [Accessed 26 March 2026].

Canessa, N. V. and Centanaro, C. (2024), "Co(mplex)city – Utente come sensore urbano e mobilità accessibile nel progetto Mobiquity | Co(mplex)city – User as urban sensor and accessible mobility in the Mobiquity project", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 16, pp. 88-97. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/1672024 [Accessed 26 March 2026].

Centers for Disease Control and Prevention (2024), *Preparing for an earthquake*. [Online] Available at: cdc.gov/earthquakes/safety/index.html [Accessed 26 March 2026].

Chittaro, L. and Buttussi, F. (2015), "Assessing knowledge retention of an immersive serious game vs. a traditional education method in aviation safety", in *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, vol. 21, issue 4, pp. 529-538. [Online] Available at: doi.org/10.1109/TVCG.2015.2391853 [Accessed 26 March 2026].

Chittaro, L. and Sioni, R. (2015), "Serious games for emergency preparedness – Evaluation of an interactive vs. a non-interactive simulation of a terror attack", in *Computers in Human Behavior*, vol. 50, pp. 508-519. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.chb.2015.03.074 [Accessed 26 March 2026].

D'Amore, A. E. (2025), "Gemello digitale e processo edilizio – Riflessioni su produttività, energia e salute | The digital twin and the building process – Reflections on productivity, energy, and health", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 18, pp. 144-161. [Online] Available at: doi.org/10.69143/2464-9309/1872025 [Accessed 26 March 2026].

Davidová, M., Barath, S. and Dickinson, S. (2023), "Ambienti culturali con prospettive non solo umane – Prototipazione attraverso ricerca e formazione | Cultural environments with more-than-human perspectives – Prototyping through research and training", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 13, pp. 165-178. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/13142023 [Accessed 26 March 2026].

Feng, Z., González, V. A., Amor, R., Lovreglio, R. and Cabrera-Guerrero, G. (2018), "Immersive virtual reality serious games for evacuation training and research – A systematic literature review", in *Computers & Education*, vol. 127, pp. 252-266. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.compedu.2018.09.002 [Accessed 26 March 2026].

Feng, Z., González, V. A., Amor, R., Spearpoint, M., Thomas, J., Sacks, R., Lovreglio, R. and Cabrera-Guerrero, G. (2020), "An immersive virtual reality serious game to enhance earthquake behavioral responses and post-earthquake evacuation preparedness in buildings", in *Advanced Engineering Informatics*, vol. 45, article 101118, pp. 1-15. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.aei.2020.101118 [Accessed 26 March 2026].

Franzo, P., Quartu, A. and Tufarelli, M. (2025), "Re-shaping fashion in Italy – Sistemi circolari, scenari phygital e formazione informale | Re-shaping fashion in Italy – Circular systems, phygital scenarios, and informal education", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 18, pp. 344-357. [Online] Available at: doi.org/10.69143/2464-9309/18212025 [Accessed 26 March 2026].

Giachetta, A. and Buondonno, L. (2024), "La formazione dell'Architetto in realtà complesse – Un nuovo approccio sul piano cognitivo | Architect training in multifaceted environments – A new cognitive level approach", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 16, pp. 50-59. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/1642024 [Accessed 26 March 2026].

Hettinger, L. J. and Riccio, G. E. (1992), "Visually induced motion sickness in virtual environments", in *Presence | Teleoperators & Virtual Environments*, vol. 1, issue 3, pp. 306-310. [Online] Available at: doi.org/10.1162/pres.1992.1.3.306 [Accessed 26 March 2026].

Hung, M.-C., Lin, C.-Y. and Hsiao, G. L.-K. (2025), "Virtual Reality in Building Evacuation – A Review", in *Fire*, vol. 8, issue 2, article 80, pp. 1-23. [Online] Available at: doi.org/10.3390/fire8020080 [Accessed 26 March 2026].

ISO/IEC (2025), *ISO/IEC 9234:2025 – Information technology – Information modelling for virtual, augmented and mixed reality based education and training systems*. [Online] Available at: iso.org/standard/83436.html [Accessed 26 March 2026].

Kaggwa, M. M., Chaimowitz, G. A., Agboinghale, P., Marginean, D. and Olagunju, A. T. (2025), "Virtual reality training programs in disaster preparedness – A systematic review", in *Discover Education*, vol. 4, article 325, pp. 1-15 [Online] Available at: doi.org/10.1007/s44217-025-00771-5 [Accessed 26 March 2026].

Keshavarz, B. (2016), "Exploring behavioral methods to reduce visually induced motion sickness in virtual environments", in Lackey, S. and Shumaker, R. (eds), *Virtual, Augmented and Mixed Reality – Proceedings of the 8th International Conference – VAMR 2016, Toronto, Canada, July 17-22, 2016*, Lecture Notes in Computer Science, vol. 9740, Springer, Cham, pp. 147-155. [Online] Available at: doi.org/10.1007/978-3-319-39907-2_14 [Accessed 26 March 2026].

LaValle, S. M. (2023), *Virtual Reality*, Cambridge University Press, Cambridge.

Li, C., Liang, W., Quigley, C., Zhao, Y. and Yu, L.-F. (2017), "Earthquake safety training through virtual drills", in *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, vol. 23, issue 4, pp. 1275-1284. [Online] Available at: doi.org/10.1109/TVCG.2017.2656958 [Accessed 26 March 2026].

Lin, J., Zhu, R., Li, N. and Becerik-Gerber, B. (2020), "Do people follow the crowd in building emergency evacuation? – A cross-cultural immersive virtual reality-based study", in *Advanced Engineering Informatics*, vol. 43, article 101040, pp. 1-13. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.aei.2020.101040 [Accessed 26 March 2026].

Liu, Q. and Liu, R. (2024), "Virtual reality for indoor emergency evacuation studies – Design, development, and implementation review", in *Safety Science*, vol. 180, article 106678. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.ssci.2024.106678 [Accessed 26 March 2026].

Lovreglio, R., González, V. A., Feng, Z., Amor, R., Spearpoint, M., Thomas, J., Trotter, M. and Sacks, R. (2018), "Prototyping virtual reality serious games for building earthquake preparedness – The Auckland City Hospital case study", in *Advanced Engineering Informatics*, vol. 38, pp. 670-682. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.aei.2018.08.018 [Accessed 26 March 2026].

Mezirow, J. (1997), "Transformative learning – Theory to practice", in *New Directions for Adult and Continuing Education*, vol. 1997, issue 74, pp. 5-12. [Online] Available at: doi.org/10.1002/ace.7401 [Accessed 26 March 2026].

Nava, C. and Melis, A. (2024), "IA generativa e complessità – Verso un nuovo paradigma nel design digitale rigenerativo | Generative IA and complexity – Towards a new paradigm in regenerative digital design", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 16, pp. 40-49. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/1632024 [Accessed 26 March 2026].

Peruccio, P. P., Liboni, M. and Mucchetti, F. (2025), "Il ruolo degli archivi d'impresa nell'era della blockchain e della IA | The role of corporate archives in the era of blockchain and AI", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 17, pp. 348-359. [Online] Available at: doi.org/10.69143/2464-9309/17242025 [Accessed 26 March 2026].

Pietroni, L., Fabbri, I., Galloppo, D. and Balsamo, M. F. (2025), "Vitality Pilot Project – Una sperimentazione interdisciplinare per accrescere la sicurezza nelle scuole dei territori ad alto rischio sismico", in Morone, A. (ed.), *Design Plurale – Casi e modelli alternativi per l'innovazione – Atti Conferenza Nazionale di Design | Plural Design – Cases and alternative models for innovation – Proceedings Italian Design Society Conference, Naples, Italy, June 26-27, 2025*, Federico II University Press, Napoli, pp. 218-233. [Online] Available at: pubblicazioni.unicam.it/retrieve/69cd7 adc-6f11-479d-9a0a-f98c48b49a62/ATTI-SID-NAPOLI-2025_estratto-1.pdf [Accessed 26 March 2026].

Pietroni, L., Mascitti, J. and Galloppo, D. (2021), "Arredi salva-vita in caso di sisma – Intelligenti, interconnessi e interagenti | Life-saving furniture during an earthquake – Intelligent, interconnected and interacting", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 10, pp. 218-229. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/10202021 [Accessed 26 March 2026].

Rajabi, M. S., Taghaddos, H. and Zahrai, S. M. (2022), "Improving Emergency Training for Earthquakes Through Immersive Virtual Environments and Anxiety Tests – A Case Study", in *Buildings*, vol. 12, issue 11, article 1850, pp. 1-22. [Online] Available at: arxiv.org/abs/2205.04993 [Accessed 26 March 2026].

Scorgie, D., Feng, Z., Paes, D., Parisi, F., Yiu, T. W. and Lovreglio, R. (2024), "Virtual reality for safety training – A systematic literature review and meta-analysis", in *Safety Science*, vol. 171, article 106372, pp. 1-13. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.ssci.2023.106372 [Accessed 26 March 2026].

Sitzmann, T. (2011), "A meta-analytic examination of the instructional effectiveness of computer-based simulation games", in *Personnel Psychology*, vol. 64, issue 2, pp. 489-528. [Online] Available at: doi.org/10.1111/j.1744-6570.2011.01190.x [Accessed 26 March 2026].

Stefan, H., Mortimer, M. and Horan, B. (2023), "Evaluating the effectiveness of virtual reality for safety-relevant training – A systematic review", in *Virtual Reality*, vol. 27, issue 4, pp. 2839-2869. [Online] Available at: doi.org/10.1007/s10055-023-00843-7 [Accessed 26 March 2026].

Vacanti, A., De Chirico, M., Crippa, D. and Fagnoni, R. (2025), "Temporalità digitale – La responsabilità dell'Interaction Design nell'alienazione digitale | Digital temporality – The responsibility of Interaction Design in digital alienation", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 17, pp. 336-347. [Online] Available at: doi.org/10.69143/2464-9309/17232025 [Accessed 26 March 2026].

Valenti, A., Scalisi, F., Sposito, C., Colaci, D. F. and Moor, G. (2025), "Design, tecnologia e povertà – Dispositivi per il progetto di architetture, oggetti e società | Design, technology, and poverty – Devices for the design of architecture, objects, and society", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 17, pp. 42-67. [Online] Available at: doi.org/10.69143/2464-9309/1722025 [Accessed 26 March 2026].

Wang, J., Samarasinghe, D. A., Aquino, D. H. M. and Ying, F. (2026), "A Systematic Review of Digital Technologies for Emergency Preparedness in Buildings", in *Buildings*, vol. 16, issue 4, article 856, pp. 1-29. [Online] Available at: doi.org/10.3390/buildings16040856 [Accessed 26 March 2026].

Wouters, P., van Nimwegen, C., van Oostendorp, H. and van der Spek, E. D. (2013), "A meta-analysis of the cognitive and motivational effects of serious games", in *Journal of Educational Psychology*, vol. 105, issue 2, pp. 249-265. [Online] Available at: doi.org/10.1037/a0031311 [Accessed 26 March 2026].

Xu, Z., Zhang, H., Wei, W. and Yang, Z. (2019), "Virtual Scene Construction for Seismic Damage of Building Ceilings and Furniture", in *Applied Sciences*, vol. 9, issue 17, article 3465, pp. 1-21. [Online] Available at: doi.org/10.3390/app9173465 [Accessed 26 March 2026].

Zehr Gantz, S., Massari, S., McDonagh, D. and Vokoun, J. (2025), "Affrontare l'insicurezza alimentare – Empatia e Design Thinking per l'apprendimento trasformativo | Addressing food insecurity – Leveraging empathy and Design Thinking to achieve transformative learning", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 17, pp. 384-397. [Online] Available at: doi.org/10.69143/2464-9309/17272025 [Accessed 26 March 2026].

AGATHÓN – International Journal of Architecture, Art and Design | n. 19 | 2026 | pp. 498-515
ISSN print: 2464-9309 – ISSN online: 2532-683X | doi.org/10.69143/2464-9309/19292026

Article Info

Received 10 March 2026
Revised 15 April 2026
Accepted 17 April 2026
Published 30 June 2026

SUPERFICI COME INFRASTRUTTURE
Design e manifattura additiva nell'Industria 5.0

SURFACES AS INFRASTRUCTURE
Design and additive manufacturing in Industry 5.0

Gianpiero Alfarano, Alessandro Spennato, Jurji Filieri

Abstract

Il contributo indaga il ruolo delle superfici modulari progettate mediante manifattura additiva come sistemi capaci di integrare innovazione tecnologica, modularità e qualità percettive dello spazio. La ricerca adotta un approccio di 'design research' basato sull'integrazione tra modellazione parametrica e prototipazione tramite stampa 3D, finalizzato allo sviluppo di moduli di superficie caratterizzati da una serialità variabile. Attraverso la manipolazione controllata di parametri geometrici sono state generate configurazioni morfologiche in grado di produrre effetti visivi e spaziali diversi. I risultati mostrano come la combinazione tra progettazione digitale e fabbricazione additiva consenta di sviluppare sistemi di superficie flessibili e riconfigurabili, con potenziali applicazioni nel design degli interni e nell'architettura. Il contributo evidenzia inoltre le implicazioni di tali strategie progettuali sui modelli di innovazione sostenibile e sugli obiettivi dell'Agenda 2030.

The paper investigates the role of modular surfaces designed through additive manufacturing as systems capable of integrating technological innovation, modularity and perceptual qualities of space. The research adopts a 'design research' approach based on the integration of parametric modelling and prototyping through 3D printing, aimed at the development of surface modules characterised by variable seriality. Through the controlled manipulation of geometric parameters, morphological configurations were generated that can produce different visual and spatial effects. The results show that combining digital design and additive manufacturing enables the development of flexible, reconfigurable surface systems with potential applications in interior design and architecture. The paper also highlights the implications of such design strategies on sustainable innovation models and the 2030 Agenda goals.

Keywords

design sostenibile, manifattura additiva, superfici sensoriali, innovazione industriale, industria 5.0

sustainable design, additive manufacturing, sensory surfaces, industrial innovation, industry 5.0

Gianpiero Alfarano, Architect and Designer, is an Associate Professor of Design at the University of Florence (Italy). Scientific Coordinator of the Master's programme in Advanced Interior Design and of the Lighting Colour Surface Lab, he deals with colours, materials, finishes and lighting, and conducts research on perception, energy efficiency of surfaces, and photoluminescent pigments. E-mail: gianpiero.alfarano@unifi.it

Alessandro Spennato, Designer, is an Adjunct Lecturer in Interior Design, Technician at the Models for Design Laboratory and Coordinator of the Lighting Colour Surface Lab at the University of Florence (Italy). He works on interior design, product design, graphics and digital prototyping. E-mail: alessandro.spennato@unifi.it

Jurji Filieri, Architect and Designer, is a Researcher and Lecturer on the Design degree course at the University of Tuscia (Italy). He is the Scientific Coordinator of UNISOL and Unusual Research Lab, an experimental research group on design and production processes for companies, and he carries out research in the fields of relational design, innovation, and the influence of art on design. E-mail: jurji.filieri@unitus.it



Nel contesto contemporaneo segnato da una sempre più articolata policrisi ambientale, sociale ed economica il progetto è chiamato a ripensare modelli produttivi, infrastrutture materiali e processi di innovazione che caratterizzano l'ambiente costruito. L'Agenda 2030 delle Nazioni Unite (UN, 2015) individua nell'Obiettivo di Sviluppo Sostenibile 9 (Fig. 1) un asse strategico per promuovere industrie resilienti, infrastrutture sostenibili e sistemi di innovazione capaci di integrare sviluppo economico, sostenibilità ambientale e progresso sociale. Il dibattito scientifico evidenzia che tali trasformazioni richiedono approcci progettuali sistemici in grado di connettere tecnologia, produzione e responsabilità ambientale (Fig. 2).

In questo scenario si colloca l'evoluzione verso i paradigmi dell'Industria 5.0. Il passaggio al nuovo paradigma dall'Industria 4.0 si caratterizza infatti per un'evoluzione sostanziale delle integrazioni tecnologiche, organizzative e valoriali che ridefiniscono il ruolo della manifattura nei sistemi socioeconomici. Se l'Industria 4.0 ha privilegiato l'integrazione verticale e orizzontale dei sistemi cyberfisici, l'interconnessione IoT e l'analisi dei big data per massimizzare l'efficienza e la produttività, l'Industria 5.0 amplia tale architettura, verso l'integrazione sistemica orientata alla sostenibilità ambientale, alla resilienza delle catene del valore e alla centralità dell'essere umano. Le tecnologie digitali avanzate – tra cui le manifatture digitali – non sono più finalizzate esclusivamente all'ottimizzazione delle performance operative, ma vengono integrate con obiettivi di riduzione dell'impatto ambientale, di flessibilità adattiva e di personalizzazione di massa.

In questo quadro la manifattura additiva rappresenta un abilitatore chiave, poiché integra progettazione generativa, produzione distribuita e uso efficiente delle risorse, favorendo modelli produttivi circolari e decentralizzati. L'integrazione uomo-macchina assume inoltre una dimensione qualitativa, valorizzando competenze, creatività e benessere dei lavoratori, in una logica di co-creazione del valore che talvolta coinvolge anche il bacino di utenza, abilitando nuove modalità di consumo e fruizione. Il design assume un ruolo di mediazione tra ricerca tecnologica, produzione e società, contribuendo alla definizione di modelli di sviluppo nei quali materiali, processi produttivi e dimensioni percettive del progetto vengono considerati in modo integrato (European Commission, 2021; Maddikunta et alii, 2022).

All'interno di questo quadro le superfici stanno progressivamente assumendo un ruolo centrale nel progetto contemporaneo. Tradizionalmente considerate elementi di finitura, esse sono oggi reinterpretate come dispositivi attivi capaci di mediare tra materia, percezione e prestazioni ambientali. Il design delle superfici contribuisce infatti alla costruzione delle qualità sensoriali dello spazio, trasformando il rivestimento in un sistema progettuale che integra dimensioni estetiche, tecniche e comunicative (Carullo and Pagliarulo, 2013; Sully, 2024): in questa prospettiva la materia diventa un agente progettuale capace di generare relazioni tra tecnologia, percezione e ambiente (Antonelli and Burckhardt, 2020).

Analogamente la diffusione delle tecnologie di fabbricazione digitale e della manifattura additiva sta ridefinendo il rapporto tra progettazione e produzione: la stampa 3D consente di realizzare geometrie complesse mantenendo una forte continuità tra modello digitale e artefatto fisico (Fig. 3), introducendo nuove filiere relazionali tra progettazione e produzione, in cui la complessità geometrica diventa una variabile controllabile e non più un limite operativo (Gibson et alii, 2021; Thompson et alii, 2016). Diversi studi evidenziano inoltre il ruolo crescente della manifattura additiva nei processi di innovazione industriale e nelle strategie di personalizzazione dei prodotti, ad esempio attraverso la progettazione personalizzata e la personalizzazione di massa (Srivastava and Rathee, 2022).

Queste trasformazioni si collocano all'interno della cosiddetta 'seconda svolta digitale', in cui il progetto non si limita alla definizione formale degli oggetti, ma si estende alla configurazione dei processi che ne determinano la produzione e la materializzazione. In questo scenario la progettazione computazionale e la fabbricazione digitale diventano strumenti complementari per lo sviluppo di sistemi progettuali caratterizzati da elevata complessità morfologica e da variabilità formale.

Nonostante il crescente interesse per tali tecnologie, il dibattito scientifico tende ancora a trattare separatamente le ricerche sulla fabbricazione additiva e gli studi sul design delle superfici. Rimane quindi poco esplorata una prospettiva integrata che interpreti la superficie come sistema progettuale attraverso il quale connettere il processo produttivo, la configurazione morfologica e l'esperienza percettiva. Alcuni studi suggeriscono tuttavia che le superfici possano essere interpretate come dispositivi complessi in cui convergono dimensioni tecnologiche, ambientali e culturali (Gasparini, 2023).

Alla luce di queste premesse il contributo propone una rilettura delle superfici progettuali come infrastrutture di innovazione capaci di integrare ricerca progettuale, sperimentazione tecnologica e sostenibilità. L'articolo presenta i risultati di una ricerca sperimentale orientata allo sviluppo di moduli di superficie generati mediante modellazione parametrica e realizzati con tecnologie di manifattura additiva. L'obiettivo è indagare come la progettazione modulare e la stampa 3D possano contribuire alla definizione di sistemi di superficie variabili e flessibili, capaci di rispondere efficacemente a condizioni ambientali in continua evoluzione e a requisiti di utenza personalizzabili. Il contributo si inserisce nel dibattito internazionale sul ruolo del design nei processi di innovazione sostenibile e propone un approccio metodologico replicabile che integra la progettazione digitale, la prototipazione e l'osservazione critica dei risultati.

Stato dell'arte: superfici progettuali, manifattura additiva e modularità | Negli ultimi anni il progetto contemporaneo ha progressivamente ridefinito il ruolo delle superfici nell'ambiente costruito, superando l'interpretazione tradizionale che le considerava semplici elementi di finitura. La letteratura evidenzia come la superficie possa essere intesa come un dispositivo capace di integrare dimensioni tecnologiche, ambientali e percettive, contribuendo alla costruzione delle qualità sensoriali dello spazio architettonico e del prodotto industriale (Sully, 2024). Al fine di rafforzare il quadro teorico e verificare il posizionamento della ricerca rispetto al dibattito internazionale, sono stati selezionati alcuni casi studio recenti che affrontano il tema della superficie in relazione alla manifattura additiva, alla modularità e alle prestazioni percettive. La selezione è stata condotta secondo i seguenti criteri: a) utilizzo di tecnologie di fabbricazione digitale o additiva; b) presenza di un sistema superficiale modulare o parametrico; c) integrazione tra configurazione geometrica, comportamento del materiale e qualità percettive; d) rilevanza nel panorama della ricerca o della pratica progettuale contemporanea (Tab. 1).

Tale interpretazione trova riscontro nei casi studio analizzati nei quali la superficie non si limita a mediare relazioni, ma contribuisce direttamente alla definizione delle prestazioni del sistema. In particolare, mentre il MX3D Bridge rappresenta un esempio di applicazione della manifattura additiva orientata principalmente alla scala strutturale, i casi del BUGA Fibre Pavilion e delle facciate stampate in sabbia mostrano una maggiore integrazione tra geometria, comportamento materiale e qualità percettive (Dillenburger et alii, 2018). Tuttavia emerge una criticità comune legata alla trasferibilità dei sistemi sviluppati, spesso limitata da costi elevati, dalla complessità dei processi o dalle difficoltà di integrazione nelle filiere produttive tradizionali. In questo quadro la modularità si configura come elemento chiave per rendere tali approcci più scalabili, consentendo di mediare tra la variabilità progettuale e la fattibilità costruttiva.

In questa prospettiva la superficie si configura come un'interfaccia tra materia, ambiente e percezione, assumendo un ruolo attivo nell'esperienza spaziale. Nel design e nell'architettura l'involucro e il rivestimento rappresentano oggi il punto di convergenza di un duplice campo d'interesse: il primo riguarda la sensibilizzazione della superficie orientata a favorire nuove modalità di interazione, l'altro ne coinvolge l'aspetto comunicativo sul piano dell'interazione visiva. In entrambi i casi la superficie assume un ruolo di mediazione, in cui aspetti tecnologici, sinestetici o culturali convivono nell'ambito del progetto (Dal Buono and Scodeller, 2016).

A tali riflessioni si affiancano studi recenti che evidenziano come le proprietà percettive dei materiali – in particolare la texture, la naturalità apparente e la configurazione superficiale – influenzino in modo significativo la qualità percepita degli ambienti interni e la risposta degli utenti. In particolare ricerche sperimentali dimostrano che superfici caratterizzate da maggiore articolazione materica e complessità geometrica producono variazioni percettive misurabili in termini di comfort visivo e valutazione estetica (Zhang, Song and Luo, 2023; Weninger et alii, 2024): tali contributi rafforzano l'interpretazione della superficie come dispositivo attivo nella costruzione dell'esperienza spaziale. In questa prospettiva il progetto può essere interpretato come un dispositivo di mediazione tra variabili eterogenee, capace di organizzare relazioni complesse tra parametri materiali, tecnologici e percettivi, secondo logiche non lineari (Mascitti and Paciotti, 2024).

Una parte significativa della ricerca contemporanea indaga il rapporto tra la progettazione materica e l'innovazione tecnologica; il concetto di 'design guidato dai materiali' ha ridefinito l'integrazione dei materiali nel processo progettuale, evidenziando come le proprietà sensoriali e performative della materia possano orientare lo sviluppo delle soluzioni progettuali (Karana et alii, 2015): approcci interdisciplinari come la 'ecologia dei materiali' (Oxman et alii, 2015) hanno ampliato la riflessione sul ruolo dei materiali integrando dimensioni biolo-



Fig. 1 | Sustainable Development Goal 9 of Agenda 2030, dedicated to the promotion of resilient infrastructure, innovation and sustainable industrialisation (credit: R. Rastelli, 2022).

Next page

Fig. 2 | Conceptual diagram relating global polycrisis, sustainable transition, Industry 5.0 paradigms and the role of design in the development of modular surface systems based on parametric design and additive manufacturing (credit: the Authors, 2026).

giche, tecnologiche e ambientali nei sistemi progettuali. Questa evoluzione è strettamente connessa allo sviluppo delle tecnologie digitali per la progettazione e la fabbricazione.

In quest'ottica la modellazione computazionale e i sistemi parametrici assumono un ruolo centrale nel controllo della complessità geometrica e nella gestione della variabilità progettuale. Studi recenti evidenziano come l'utilizzo di modelli impliciti e algoritmici consenta una maggiore coerenza tra la fase di progettazione e quella di produzione additiva, rendendo possibile la generazione di superfici complesse direttamente compatibili con i processi di fabbricazione (Li et alii, 2018). Ciò contribuisce a superare la tradizionale separazione tra forma e processo, integrando sin dalle prime fasi progettuali logiche costruttive e prestazionali.

Gli strumenti di modellazione parametrica consentono di generare sistemi morfologici complessi con variazioni controllate di geometria e densità, favorendo la creazione di superfici in grado di produrre effetti spaziali differenziati: in questo contesto la cosiddetta 'seconda svolta digitale' ha ridefinito il rapporto tra progetto e produzione, estendendo il ruolo del design alla configurazione dei processi di materializzazione dell'artefatto (Carpo, 2017).

Parallelamente la diffusione della manifattura additiva ha introdotto trasformazioni significative nei processi produttivi, consentendo la realizzazione di geometrie complesse difficilmente ottenibili con metodi industriali tradizionali. La stampa 3D permette infatti di produrre componenti con elevata complessità morfologica (Fig. 4) mantenendo continuità tra modello digitale e artefatto fisico (Gibson et alii, 2021). Diversi studi evidenziano inoltre il ruolo crescente della manifattura additiva nei processi di innovazione industriale e nelle strategie di personalizzazione dei prodotti (Srivastava and Rathee, 2022; Bollzan, 2020).

Ulteriori contributi evidenziano come la manifattura additiva stia progressivamente evolvendo da tecnologia di prototipazione a sistema produttivo avanzato, capace di incidere sui modelli di sviluppo del prodotto, sulla customizzazione e sulla gestione della complessità geometrica. In particolare le revisioni sistematiche sul tema sottolineano come la stampa 3D consenta di integrare forma, funzione e prestazione in un unico processo, aprendo nuove possibilità per la progettazione di superfici articolate e performative (Ngo et alii, 2018); ma emergono anche criticità legate a costi, tempi e alla scalabilità industriale, che rendono necessaria una valutazione integrata tra le potenzialità formali e le condizioni produttive (Yang and Zhao, 2015).

Nel campo dell'architettura e del design queste trasformazioni hanno favorito ricerche orientate alla sperimentazione di componenti e sistemi modulari. In questa prospettiva la modularità non può essere interpretata esclusivamente come principio di serialità, ma come strategia per la gestione della complessità e dell'adattività dei sistemi di involucro, capace di integrare variabilità, prestazioni e controllo progettuale (Manni and Valzano, 2023). In tale contesto recenti ricerche mostrano come l'integrazione tra design parametrico, fabbricazione digitale e costruzione modulare consenta di trasferire la variabilità progettuale in sistemi costruibili e assemblabili anche a scala architettonica.

Alcuni studi dimostrano come la combinazione tra componenti modulari e processi additivi permetta di realizzare strutture complesse mantenendo elevati livelli di controllo geometrico e adattabilità (Su et alii, 2023). Parallelamente l'uso dei materiali come strumenti progettuali evidenzia la possibilità di integrare prestazioni, sostenibilità ed espressività all'interno di un unico sistema, rafforzando il ruolo del design nella gestione della complessità (Dahy, 2023). Altri studi hanno esplorato l'utilizzo della stampa 3D per la realizzazione di elementi architettonici con prestazioni integrate (Doubrovski, Verlinden and Geraedts, 2012) ed altri ancora hanno indagato la progettazione di materiali programmabili e sistemi costruttivi adattivi (Correa et alii, 2023; Morbiducci, Polverino and Battaglia, 2023). Non mancano poi recenti studi che evidenziano il ruolo della fabbricazione digitale come strumento in grado di integrare innovazione tecnologica e sostenibilità nei processi architettonici (Dahy, 2023).

Il rapporto tra modularità e sostenibilità entra dunque a pieno diritto nel dibattito sulla transizione verso modelli di economia circolare: il design modulare è considerato una strategia capace di incrementare la durabilità dei prodotti e di facilitare manutenzione, riparazione e rifabbricazione (Pietroni, Di Stefano and Galloppo, 2023), contribuendo alla riduzione del consumo di risorse (EMF, 2021) e allo sviluppo di pratiche di consumo e gestione dei manufatti non lineari, iterativi.

In questa direzione ricerche sull'architettura responsiva evidenziano come l'intelligenza del sistema possa essere incorporata direttamente nella materia e nella configurazione geometrica, riducendo la dipendenza da sistemi tecnologici attivi e favorendo strategie passive a basso consumo energetico (Holstov, Bridgens and Farmer, 2017), mentre studi sull'impiego della manifattura additiva mostrano come l'efficacia di tali tecnologie dipenda dalla loro integrazione all'interno di sistemi produttivi, decisionali e progettuali coerenti, nei quali modularità, materiali e obiettivi ambientali siano assunti entro una prospettiva integrata (Raffaeli et alii, 2021).

Accanto alle questioni tecnologiche emerge il tema della complessità dei sistemi progettuali contemporanei, caratterizzati da interazioni tra fattori tecnici, ambientali e sociali che richiedono approcci interdisciplinari (Porfirione, Ferrari Tumay, Leggiero, 2024): in questo contesto il design può essere interpretato come una pratica di mediazione tra attori, tecnologie e processi produttivi (Celaschi, Casoni and Formia, 2024), mentre studi sulla transizione circolare evidenziano il coinvolgimento di diversi attori lungo la filiera industriale (Maffei et alii, 2024).

Nonostante la crescente diffusione della ricerca sulla fabbricazione digitale e sul design delle superfici, la letteratura evidenzia una scarsa integrazione sistemica tra gli studi sulla superficie, sulla modularità e sulla manifattura additiva. In particolare mentre la letteratura sulla manifattura additiva sottolinea le opportunità legate alla libertà geometrica e alla personalizzazione, e gli studi sulla percezione evidenziano l'importanza delle qualità materiche e superficiali nella definizione dell'esperienza spaziale, manca ancora una riflessione pienamente integrata che metta in relazione questi ambiti all'interno di un unico quadro metodologico. Questo disallineamento evidenzia la necessità di consi-

derare la superficie come infrastruttura progettuale, capace di connettere il processo digitale, l'organizzazione modulare e il comportamento percettivo. In questo senso la superficie è parte integrante del sistema dell'involucro, in cui il rapporto tra modulo, misura e costruzione definisce non solo la configurazione formale, ma anche il comportamento complessivo del sistema architettonico (Scala, 2023).

Metodologia e fasi della ricerca | La ricerca si colloca nel campo della 'design research' applicata alla sperimentazione materica e tecnologica e adotta un approccio metodologico iterativo che integra progettazione parametrica, fabbricazione digitale e osservazione critica dei prototipi. L'impostazione si basa sul paradigma della 'research-through-design', in cui la conoscenza emerge attraverso il processo progettuale e la produzione di artefatti sperimentali capaci di verificare le relazioni tra forma, materia e prestazioni percettive (Frayling, 1994; Zimmerman, Stolterman and Forlizzi, 2010). In questo quadro il progetto diventa uno strumento di indagine basato su cicli successivi di progettazione, prototipazione e validazione, teso a produrre un modello di produzione replicabile, non chiuso, aggiornabile o correggibile.

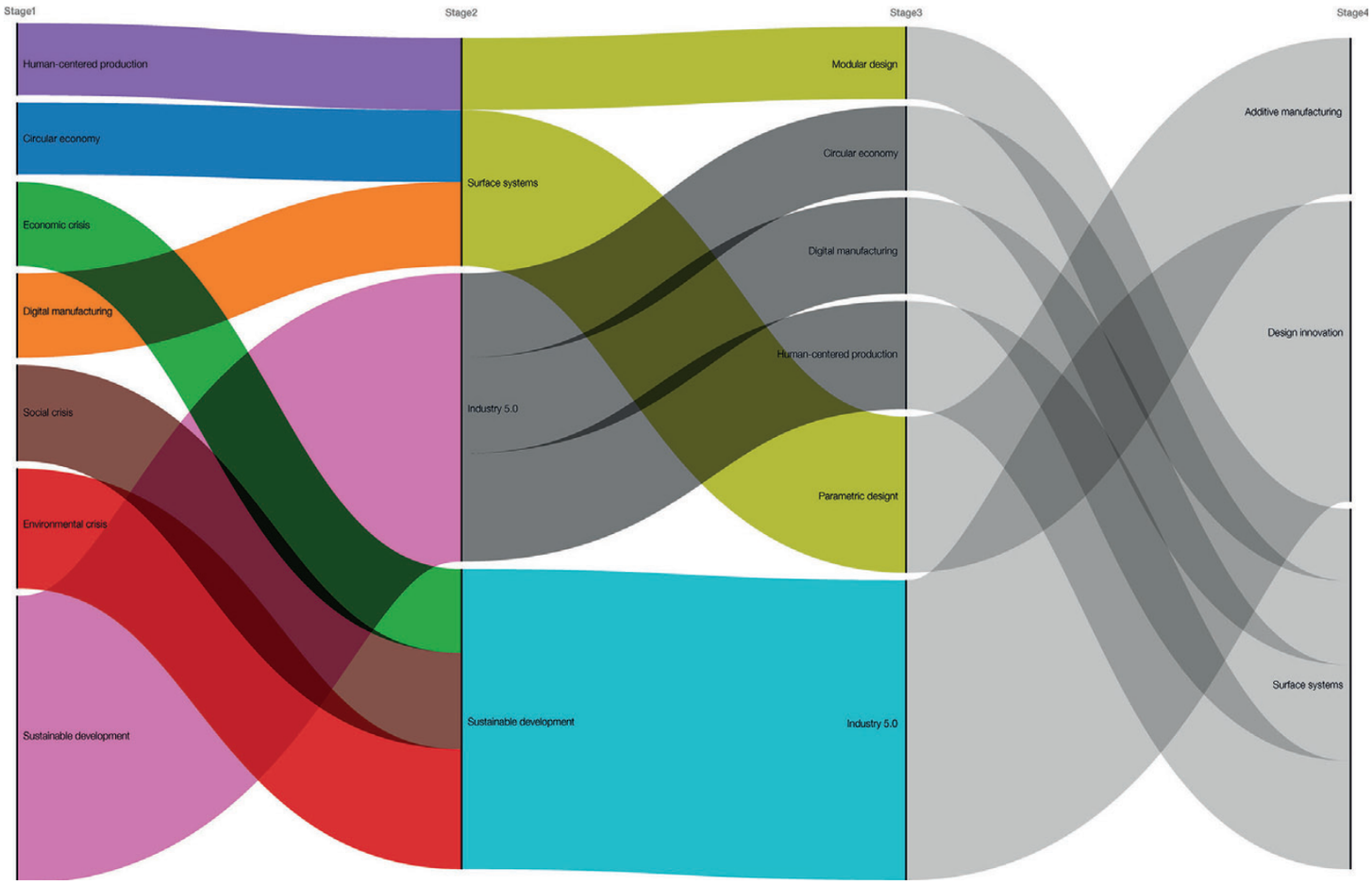
L'obiettivo metodologico è esplorare le potenzialità della manifattura additiva nella progettazione di sistemi di superficie modulari caratterizzati da variazioni controllate di geometria e di profondità. L'ipotesi presuppone che la combinazione tra progettazione parametrica e stampa 3D possa favorire sistemi a serialità variabile, in cui la modularità non coincide con la ripetizione identica degli elementi, bensì con la variazione controllata dei parametri progettuali. Tale impostazione è coerente con gli approcci del Design for Additive Manufacturing (Fig. 5) che propongono di integrare le logiche della fabbricazione additiva fin dalle prime fasi del progetto (Thompson et alii, 2016).

Il protocollo di ricerca è stato articolato in una sequenza che collega la progettazione digitale, la prototipazione fisica e l'analisi dei risultati. La prima fase ha riguardato la definizione di un sistema parametrico per la generazione di moduli di superficie con variazioni morfologiche controllate. A partire da una matrice geometrica di base sono stati individuati parametri progettuali in grado di influenzare la configurazione dei moduli, tra cui la profondità del rilievo, la densità della texture e l'inclinazione delle superfici. La manipolazione di tali parametri ha consentito di generare una famiglia di moduli differenti ma riconducibili a una stessa logica generativa, attraverso la cui associazione combinatoria la superficie intera (intesa in termini corali) acquista un proprio valore fisico e semantico.

La seconda fase ha riguardato la materializzazione dei modelli digitali mediante tecnologie di fabbricazione additiva. I moduli sono stati realizzati mediante stampa 3D con tecnologia FDM (Fused Deposition Modeling), che consente la deposizione stratificata di materiale termoplastico a partire da modelli tridimensionali. I prototipi sono stati realizzati in PLA, con spessore variabile tra 0,1 e 0,2 mm e riempimento compreso tra il 15% e il 30%, in funzione delle caratteristiche morfologiche dei moduli. La scelta di questa tecnologia è legata alla sua diffusione nei contesti di prototipazione progettuale e alla possibilità di produrre componenti complessi, come evidenziato anche dalla letteratura sul ruolo della stampa 3D nello sviluppo di modelli produttivi flessibili (Bollzan, 2020).

Una volta realizzati i prototipi la terza fase ha mirato allo studio delle configurazioni aggregative dei moduli e delle implicazioni percettive evocate nei contesti ambientali di utenza o di allestimento. L'osservazione è stata condotta simulando diverse condizioni di illuminazione e confrontando le configurazioni ottenute mediante la combinazione dei moduli. L'attenzione si è concentrata sulla relazione tra morfologia della superficie, comportamento delle ombre e percezione visiva delle texture, in continuità con gli studi che indagano il ruolo della materia nella costruzione dell'esperienza sensoriale dello spazio (Karana et alii, 2015).

La fase finale ha riguardato la sistematizzazione dei risultati e la definizione di un repertorio di assemblaggi modulari, ciascuno ottenuto dalla combinazione dei moduli sviluppati. Tale repertorio rappresenta un sistema aperto di possibilità progettuali e dimostra come la serialità variabile possa generare superfici differenziate a partire da un numero limitato di componenti. La ricerca propone quindi un approccio metodologico replicabile, che integra la progettazione parametrica e la manifattura additiva come strumenti di sperimentazione progettuale nel campo delle superfici. Al fine di garantire la replicabilità del processo sperimentale si ri-



porta una sintesi del protocollo metodologico adottato, articolato in input, strumenti, parametri, esiti e criteri di valutazione (Tab. 2).

Per rafforzare il posizionamento metodologico della ricerca il protocollo sviluppato è stato confrontato con alcuni casi internazionali recenti relativi a sistemi di superficie additiva performativa, configurazioni parametrico-funzionali e involucri adattivi. I casi sono stati selezionati non tanto per affinità formale, quanto per la comparabilità del dispositivo sperimentale: in tutti è infatti riconoscibile una catena operativa che collega la definizione parametrica della geometria, la materializzazione tramite processi additivi e la verifica di una prestazione misurabile. In questo senso, il confronto consente di chiarire meglio i punti di forza, i limiti e la trasferibilità del presente contributo.

Un primo gruppo di precedenti riguarda le superfici additive ad alte prestazioni acustiche: nello studio sui pannelli microforati stampati in 3D con cavità multiple la variazione sistematica di parametri geometrici come diametro dei pori, rapporto di perforazione, spessore e profondità della retrocavità è stata verificata attraverso simulazione numerica e prova tecnica in tubo d'impedenza, mostrando che la differenziazione parametrica dei moduli può produrre un assorbimento più ampio in banda e più controllato rispetto a sistemi uniformi (Deepak et alii, 2024).

In questo caso l'elemento metodologicamente più rilevante consiste nel fatto che la variabilità non è assunta come semplice esito estetico, ma come dispositivo prestazionale suscettibile di verifica mediante un'osservazione prevalentemente quantitativa. Al tempo stesso tale riferimento mette in evidenza una prima differenza di sviluppo e un limite della ricerca qui presentata: se da un lato il protocollo adottato analizza con accuratezza gli effetti percettivi di luce, ombra e texture attraverso un approccio sperimentale empirico e prevalentemente qualitativo, dall'altro non integra ancora una fase di misurazione strumentale delle prestazioni funzionali della superficie. Ne consegue che il contributo del paper risulta, allo stato attuale, più solido sul piano morfologico-percettivo che su quello metrologico-prestazionale e che la ricerca richiede un ulteriore sviluppo orientato alla raccolta di dati analitici mediante osservazione strumentale.

Un secondo riferimento è costituito dalle ricerche su metamateriali acustici regolabili integralmente e stampati in 3D, come il caso della cella risonante SLA con membrana magnetica, progettata per modificare la frequenza di risonanza dopo la fabbricazione (Gardiner et alii, 2024). Qui il punto di interesse non è soltanto la stampa di una geometria complessa, ma l'integrazione tra la fabbricazione additiva, il materiale funzionalizzato e il comportamento adattivo del componente. Rispetto a tale linea di ricerca il contributo qui proposto condivide l'idea di una geometria generativa aperta e di una produzione non standardizzata, ma se ne distingue perché lavora su un'adattività 'debole', affidata alla ricombinazione dei moduli e agli effetti percettivi contestuali, non a una trasformazione attiva o post-fabbricazione del componente (Figg. 6-8). Il confronto rende quindi esplicito che la trasferibilità del metodo è elevata per superfici modulari statiche o semi-variabili, mentre resta limitata nel caso di sistemi realmente responsivi o riconfigurabili in esercizio.

Un terzo campo di confronto riguarda le superfici biomimetiche orientate al grip e alla risposta tribologica. Uno studio recente su trame bioispirate realizzate in PLA mediante stampa 3D con tecnologia FDM (Fused Deposition Modeling) ha indagato cinque texture derivate da modelli naturali, verificandone il comportamento in termini di attrito anisotropo e usura mediante prove di scorrimento reciproco. In questo caso, come nella presente ricerca, la superficie è intesa come interfaccia attiva tra geometria e comportamento, ma la procedura sperimentale si sposta da un'osservazione prevalentemente visivo-percettiva a una caratterizzazione quantitativa dell'interazione meccanica (paragonabile al primo caso studio citato).

Il parallelismo è particolarmente utile perché mostra ancora una possibile estensione metodologica del protocollo qui adottato: i parametri oggi usati per modulare profondità del rilievo, densità della trame e inclinazione delle superfici potrebbero essere messi in relazione, in studi successivi, anche con coefficienti di attrito, comfort aptico o resistenza all'usura, ampliando la trasferibilità del sistema verso applicazioni dove la performance tattile o di grip è centrale (Mzali et alii, 2024).

Un quarto termine di paragone è offerto dai più recenti studi sugli involucri adattivi 4D-printed, in particolare dal sistema di schermatura igromorfica a base biologica sviluppato per una facciata reale, nel quale strutture cellulosiche bistrato realizzate mediante la tecnologia FFF (Fused Filament Fabrication) sono state testate in laboratorio, monitorate per oltre un anno in condizioni atmosferiche reali e poi portate a scala architettonica. Questo caso è particolarmente rilevante perché mostra un avanzamento metodologico rispetto alla prototipazione di laboratorio: il ciclo progettazione-fabbricazione-test non si arresta alla verifica del campione, ma comprende anche prove di robustezza, verifiche di comportamento agli agenti atmosferici, il trasferimento alla scala architettonica e la dimostrazione

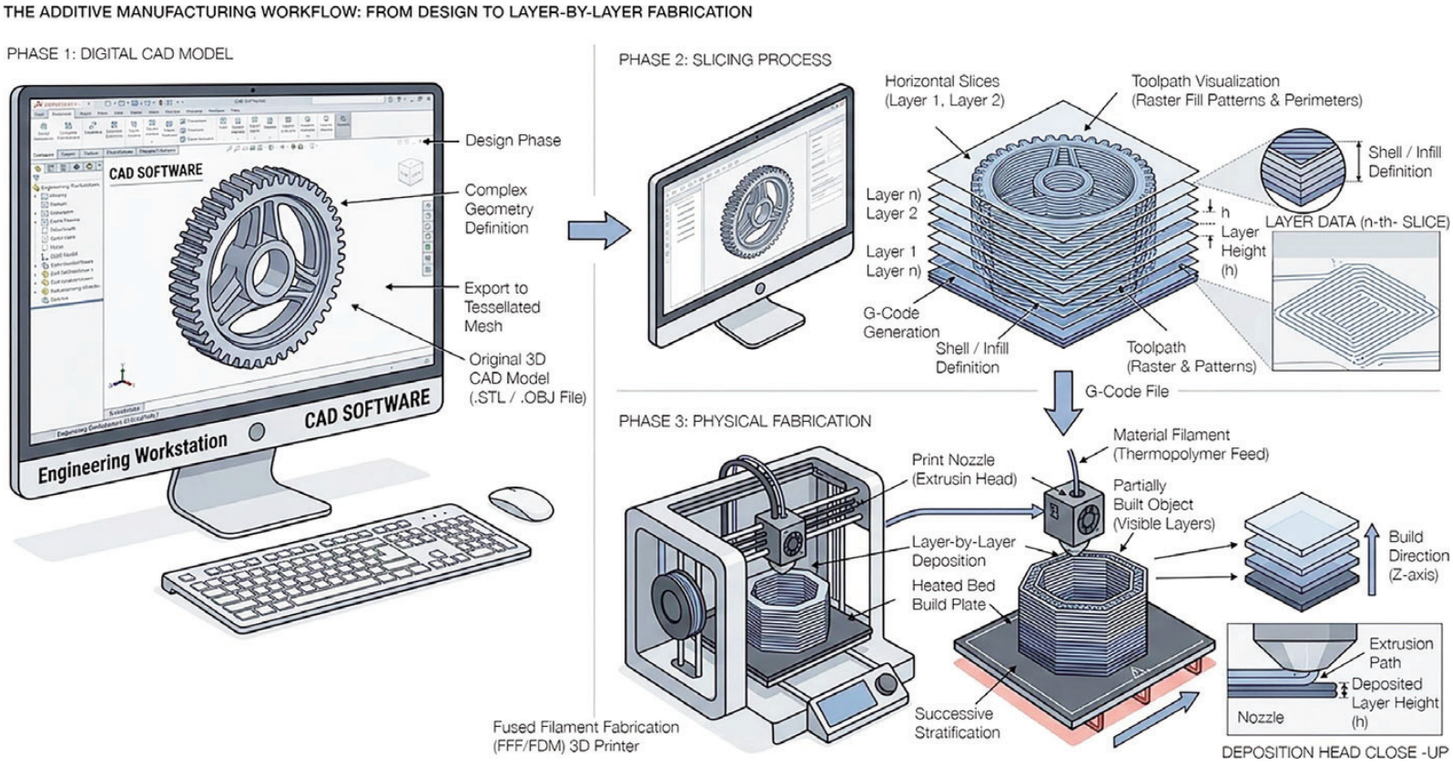


Fig. 3 | Schematic of the additive manufacturing process based on layered material deposition from a three-dimensional digital model. The workflow includes CAD modelling, slicing the model into layers, and sequential deposition of the material during 3D printing (credit: the Authors, 2026).

Case study	Technology	Modularity	Performance	Perceptual qualities	Limitations	Transferability
MX3D Bridge (Amsterdam)	Metal 3D printing (WAAM)	Low (continuous element)	Advanced structural engineering	Continuous surface and emerging texture	High costs and technical complexity	Limited to major infrastructure projects
BUGA Fibre Pavilion (ICD/ITKE, 2019)	Robotic manufacturing and composite fibres	Medium (separate components)	High structural and environmental performance	Highly developed material and perceptual articulation	A complex and non-standardised process	Transferability limited to experimental architecture
3D Printed Sand Mould Facade (ETH Zürich)	3D sand printing + casting	High (custom modules)	Environmental control and shading	Textural quality and variations in light	Material fragility and durability	Suitable for architectural facades

Tab. 1 | Comparison of international case studies on surfaces, modularity, and digital fabrication (credit: the Authors, 2026).

in opera. Rispetto a questo caso studio, la ricerca qui presentata si distingue per la costruzione di un repertorio aperto di assemblaggi e per la definizione di una grammatica modulare replicabile. Tuttavia la validazione dei risultati si colloca ancora soprattutto sul piano prototipale e percettivo-ambientale. Il confronto indica quindi, come sviluppo successivo necessario per rafforzarne il contributo scientifico, l'estensione del protocollo a prove di durabilità, a verifiche in condizioni d'uso e a test a scala applicativa.

Nel loro insieme questi precedenti consentono di precisare meglio il contributo specifico della presente ricerca, il cui punto di forza non consiste nell'introdurre una nuova performance tecnica in senso stretto, bensì nel proporre un metodo replicabile per costruire superfici modulari a serialità variabile, nelle quali la fabbricazione additiva è assunta come condizione che rende possibile l'articolazione controllata della differenza. In confronto ai casi prestazionali più avanzati lo studio presenta una maggiore accessibilità tecnologica – grazie all'uso di FDM e PLA, processi diffusi nei contesti di prototipazione progettuale – e una più immediata trasferibilità nei campi dell'interior, dell'allestimento e dei dispositivi di qualificazione percettiva delle superfici. D'altro canto la sua replicabilità è oggi soprattutto procedurale e geometrica, mentre la piena trasferibilità verso ambiti ad alta prestazione richiede l'integrazione di metriche quantitative, protocolli di test standardizzati e verifiche a scala d'uso (Tab. 3).

Il confronto con i casi recenti conferma che la presente ricerca si colloca in una linea di studi che usa la fabbricazione additiva non soltanto per produrre complessità formale, ma per costruire relazioni verificabili tra parametri geometrici, comportamento della superficie e qualità dell'esperienza. Entro tale quadro il contributo specifico del lavoro consiste nella definizione di un protocollo replicabile per superfici modulari a serialità variabile, la cui ulteriore evoluzione potrà riguardare l'integrazione di metriche prestazionali quantitative e la validazione a scala applicativa.

Risultati sperimentali | Al fine di rendere verificabile la relazione tra configurazioni morfologiche ed effetti percettivi, sono stati definiti criteri di valutazione specifici, applicati in modo sistematico ai prototipi sviluppati. Le metriche adottate, prevalentemente di natura qualitativa ma strutturate secondo parametri controllati, consentono di confrontare le diverse configurazioni in relazione alle prestazioni percettive generate dall'interazione tra luce e superficie. Le principali metriche di valutazione sono le seguenti:
a) contrasto ombra-luce – capacità della superficie di generare differenze percettive tra zone illuminate e in ombra, in relazione alla profondità e all'inclinazione dell'articolazione superficiale;
b) variazione cromatica percepita – modificazione della percezione del colore in funzione dell'orientamento delle superfici e delle condizioni di illuminazione;
c) profondità visiva – grado di tridimensionalità percepita della superficie, legato alla stratificazione dei livelli e alla complessità geometrica;
d) leggibilità della trama – chiarezza e riconoscibilità della configurazione geometrica rispetto alla distanza e all'angolo di osservazione;
e) variabilità percettiva – capacità del sistema modulare di generare effetti differenti a partire da variazioni parametriche controllate.

Lo studio è stato condotto mantenendo costanti le condizioni di illuminazione e di osservazione, al fine di garantire la comparabilità dei risultati, mentre l'analisi dei prototipi è stata condotta applicando le metriche sopra descritte, per correlare in modo sistematico le variazioni parametriche agli effetti percettivi osservati. In particolare le configurazioni caratterizzate da maggiore profondità e inclinazione delle superfici hanno evidenziato un incremento significativo del contrasto ombra-luce e della profondità visiva, mentre quelle a densità più elevata hanno mostrato una riduzione della leggibilità ma un aumento della variabilità percettiva (Fig. 9).

La sperimentazione ha consentito di sviluppare un ampio repertorio di soluzioni formali / funzionali diversificate, caratterizzate da variazioni di forma controllate, attraverso la manipolazione parametrica di alcuni caratteri geometrici fondamentali (Figg. 10, 11). A partire da una matrice progettuale di base sono stati prodotti moduli con variazioni di profondità, incidenza luminosa e densità del materiale, la cui combinazione ha generato effetti percettivi diversi in funzione delle condizioni di illuminazione e della scala. I prototipi realizzati mediante stampa 3D hanno dimostrato che la manifattura additiva consente una forte continuità tra la modellazione digitale e la produzione fisica. La possibilità di produrre componenti complessi senza l'utilizzo di stampi o lavorazioni sottrattive ha permesso di mantenere elevata fedeltà tra la geometria progettata e il risultato materiale, confermando il ruolo della fabbricazione additiva nei processi di sperimentazione progettuale (Gibson et alii, 2021).

I risultati confermano la coerenza tra le ipotesi progettuali e gli effetti osservati, evidenziando il ruolo della variazione parametrica come strumento di controllo delle prestazioni percettive. I moduli sviluppati possono essere combinati per generare diverse configurazioni di superficie, pur mantenendo una coerenza morfologica complessiva. Questo approccio può essere interpretato come una forma di 'serialità flessibile', in cui la ripetizione modulare non coincide con la replica identica degli elementi, bensì con la variazione controllata delle caratteristiche fisiche di ciascuna unità.

Un tale espediente ridefinisce il significato di superficie, attribuendole qualità dinamiche non usuali nel campo del design di prodotto e del disegno architettonico, che risultano tanto più sostenibili ed efficaci quanto più riescono a corrispondere a esigenze mutevoli di riconfigurazione nel tempo e nello spazio della stessa superficie. La modularità consente infatti di sostituire o riconfigurare singoli componenti senza compromettere l'intero sistema, contribuendo a prolungare il ciclo di vita dei prodotti e a ridurre il consumo di risorse (Pietroni, Di Stefano and Galloppo, 2023).

Dal punto di vista percettivo l'analisi dei prototipi ha evidenziato come la variazione della profondità e dell'inclinazione delle superfici produca effetti differenti nella distribuzione delle ombre e nella percezione visiva delle texture (Fig. 12). Le configurazioni generate mostrano come piccole variazioni geometriche possano produrre effetti significativi anche sul comportamento acustico e ottico delle superfici, suggerendo la possibilità di utilizzare tali parametri come strumenti progettuali per modulare le qualità sensoriali dello spazio (Figg. 13, 14).

Limiti e implicazioni per il progetto | Nonostante i risultati evidenzino il potenziale della combinazione tra progettazione parametrica e manifattura additiva nello sviluppo di sistemi di superficie modulari, la ricerca presenta ancora dei limiti da considerare per una piena trasferibilità dei risultati. La sperimentazione è stata infatti condotta in un contesto prototipale, in cui i moduli sono stati realizzati con materiali e tecnologie di stampa 3D impiegate prevalentemente a fini di ricerca; sebbene tali tecnologie consentano di esplorare configurazioni formali complesse e sistemi modulari variabili, il passaggio alla scala industriale richiede ulteriori approfondimenti sui costi di produzione, sui tempi di fabbricazione e sulle prestazioni fisico-meccaniche dei materiali.

È inoltre da rilevare che il livello di maturazione ancora iniziale della ricerca condotta suggerisce l'opportunità di un'analisi metrologica (ad esempio ottica, acustica, illuminotecnica) degli effetti visivi e ambientali prodotti attraverso il controllo di parametri progettuali legati al design del singolo modulo, alla costruzione e alla ripetizione di geometrie di superficie, nonché alla trasformazione delle stesse superfici per effetto di processi di sostituzione modulare o di metamorfosi cronologica.

La letteratura evidenzia inoltre che la transizione dalla prototipazione alla produzione industriale

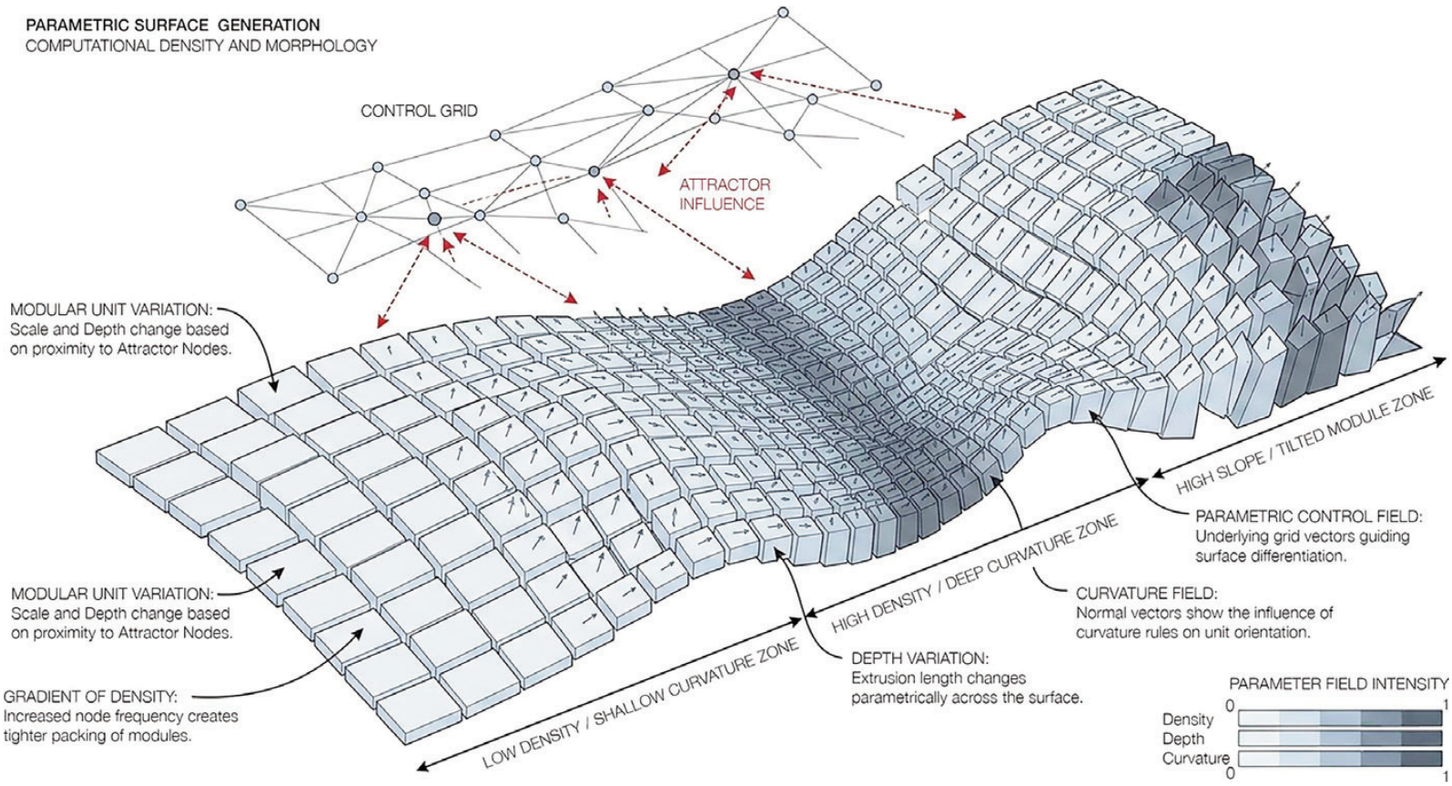


Fig. 4 | Example of a parametric surface generated using computational algorithms controlling density and morphological variations (credit: the Authors, 2026).

rappresenta una delle principali sfide per l'adozione diffusa della manifattura additiva. Sebbene la stampa 3D consenta di realizzare componenti ad alta complessità geometrica, la sua integrazione nelle filiere produttive richiede un ripensamento delle logiche progettuali e organizzative, in cui il design svolge un ruolo di mediazione tra ricerca tecnologica, produzione e innovazione.

Un ulteriore limite riguarda la valutazione degli impatti ambientali e sociali dei sistemi progettuali sviluppati: la modularità e la riconfigurabilità dei componenti possono contribuire a prolungare il ciclo di vita dei prodotti; tuttavia la misurazione dei benefici ambientali richiede protocolli di analisi più strutturati basati su metodologie di Life Cycle Assessment e su approcci integrati di valutazione degli impatti sulla biosfera (Sposito and De Giovanni, 2023). Accanto agli aspetti tecnologici emergono anche barriere di natura culturale e organizzativa che possono influenzare la diffusione di approcci progettuali basati sulla fabbricazione digitale. La transizione verso modelli produttivi più sostenibili richiede infatti il coinvolgimento di diversi attori lungo l'intera filiera industriale e può essere rallentata da fattori economici, normativi e organizzativi (Maffei et alii, 2024).

Nonostante queste criticità i risultati suggeriscono alcune direzioni di trasferibilità. Il sistema di superfici modulari basato sulla serialità variabile può essere applicato in diversi ambiti del progetto, tra cui il design degli interni, l'architettura e il design del prodotto. Allo stesso tempo l'approccio metodologico basato sull'integrazione tra progettazione parametrica e fabbricazione digitale può essere replicato in altri contesti di sperimentazione progettuale.

Nel complesso la ricerca evidenzia il potenziale del design come disciplina capace di connettere innovazione tecnologica e sostenibilità nei processi di trasformazione dell'ambiente costruito (Fig. 15): questo obiettivo passa attraverso un approccio sperimentale, rapidamente orientato al confronto e al suo trasferimento nei settori della produzione materiale.

Relazione con gli Obiettivi di Sviluppo Sostenibile | La ricerca si inserisce nel quadro degli Obiettivi di Sviluppo Sostenibile SDG delle Nazioni Unite, contribuendo in particolare agli SDG 9 (Industria, innovazione e infrastrutture), 11 (Città e comunità sostenibili) e 12 (Consumo e produzione responsabili). In relazione all'SDG 9 l'integrazione tra modellazione parametrica, manifattura additiva e design delle superfici evidenzia il potenziale delle tecnologie digitali come strumenti per l'innovazione dei processi progettuali e produttivi.

Per quanto riguarda l'SDG 11 il contributo propone una riflessione sul ruolo delle superfici come dispositivi attivi nella definizione della qualità percettiva degli spazi, con possibili ricadute sul benessere degli utenti e sulla qualità dell'ambiente costruito; in questo senso la ricerca suggerisce una prospettiva in cui le superfici non sono solo elementi di finitura, ma componenti capaci di incidere sulle dinamiche spaziali e relazionali. In relazione all'SDG 12 l'adozione di logiche modulari e di processi di fabbricazione additiva apre a scenari di maggiore efficienza nell'uso delle risorse, riduzione degli scarti e ottimizzazione dei processi produttivi. Tuttavia tali benefici dipendono strettamente dalle condizioni di applicazione, in particolare dalla scelta dei materiali, dai consumi energetici e dalla scala produttiva.

Accanto ai benefici diretti la ricerca sviluppa sinergie indirette con altri obiettivi, tra cui l'SDG 13 (Lotta al cambiamento climatico), in relazione al potenziale di riduzione degli sprechi e all'ottimizzazione dei processi, e l'SDG 8 (Lavoro dignitoso e crescita economica), in riferimento allo sviluppo di nuove competenze e filiere produttive legate alla fabbricazione digitale.

Al tempo stesso emergono possibili compromessi e criticità. In particolare l'adozione della manifattura additiva può comportare un aumento dei consumi energetici e dei costi di produzione, limitandone l'effettiva sostenibilità se non inserita in filiere ottimizzate; inoltre la complessità dei processi e delle competenze richieste può costituire una barriera alla diffusione su larga scala, incidendo sulla reale trasferibilità dei modelli proposti. In tale ottica il contributo evidenzia come l'efficacia delle strategie progettuali basate su superfici modulari e sulla fabbricazione digitale dipenda da condizioni di contesto specifiche, che includono l'accesso alle tecnologie, l'organizzazione della filiera produttiva e l'integrazione tra progettazione, produzione e gestione del ciclo di vita.

Conclusioni | Uno dei principali contributi della ricerca consiste nella proposta di un approccio progettuale basato sulla serialità variabile, in cui la modularità non coincide con la ripetizione identica dei componenti, bensì con la variazione controllata di parametri morfologici condivisi. Tale impostazione consente di generare configurazioni diverse a partire da un numero limitato di elementi modulari, ampliando le possibilità espressive e funzionali del progetto. In questo senso la manifattura additiva si configura come uno strumento progettuale capace di supportare lo sviluppo di sistemi complessi nei quali progettazione e produzione risultano strettamente integrate (Thompson et alii, 2016). Dal punto di vista teorico il contributo si inserisce nel dibattito

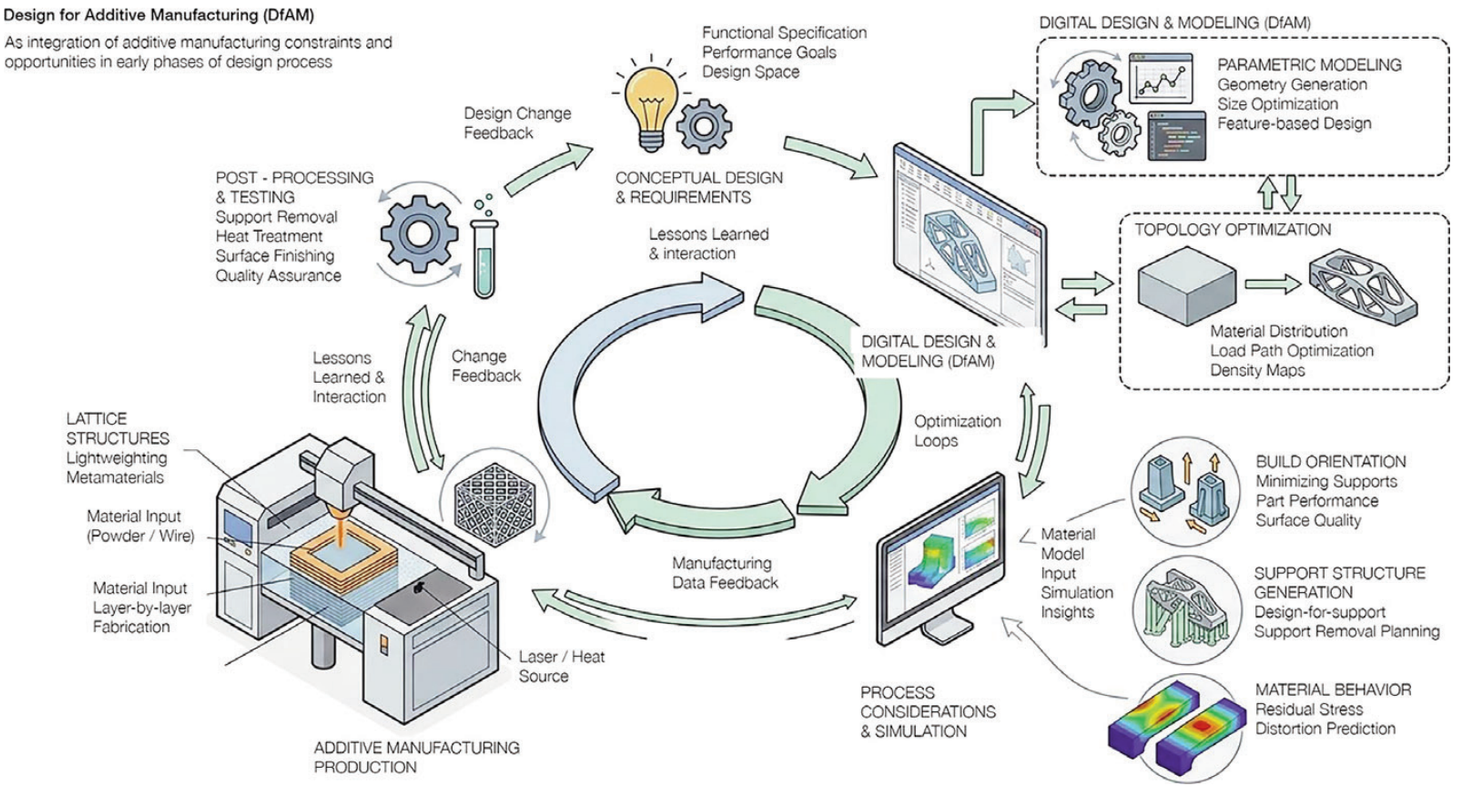


Fig. 5 | Conceptual diagram of Design for Additive Manufacturing, which integrates additive design and manufacturing early in the design process (credit: the Authors, 2026).

internazionale sulla trasformazione dei processi progettuali nell'era della fabbricazione digitale. La cosiddetta seconda svolta digitale' ha ridefinito il rapporto tra progetto e produzione, rendendo possibile lo sviluppo di sistemi caratterizzati da elevata complessità morfologica e da continuità tra la modellazione computazionale e la materializzazione dell'artefatto. In questo scenario il design assume un ruolo sempre più rilevante come disciplina capace di mediare tra innovazione tecnologica, processi produttivi e le dimensioni culturali del progetto.

Un ulteriore contributo riguarda la possibilità di interpretare i sistemi di superficie modulari come dispositivi progettuali coerenti con i principi dell'economia circolare. La modularità e la riconfigurabilità dei componenti possono contribuire a prolungare il ciclo di vita dei sistemi progettuali e a facilitare le operazioni di manutenzione, sostituzione e riuso, favorendo la riduzione del consumo di risorse e lo sviluppo di modelli produttivi più sostenibili.

Alla luce di queste considerazioni il contributo si colloca in relazione agli Obiettivi di Sviluppo Sostenibile dell'Agenda 2030, in particolare rispetto all'Obiettivo 9, che promuove industrie resilienti, infrastrutture sostenibili e sistemi di innovazione. L'integrazione tra progettazione digitale, fabbricazione additiva e strategie di modularità può contribuire allo sviluppo di modelli produttivi più flessibili e adattivi, generando sinergie anche con l'Obiettivo 12, relativo alla produzione e al consumo responsabili, e con l'Obiettivo 11 dedicato alle città e comunità sostenibili.

Nonostante i risultati ottenuti la ricerca apre ulteriori prospettive di sviluppo. Sarà necessario sviluppare protocolli di valutazione più sistematici per analizzare gli impatti ambientali e sociali dei sistemi progettuali sviluppati, integrando metodologie di analisi del ciclo di vita e strumenti di valutazione delle prestazioni ambientali. Allo stesso tempo sarà opportuno indagare le condizioni che possono favorire il trasferimento dei risultati dalla scala sperimentale a quella industriale. Nel complesso la ricerca evidenzia il potenziale delle superfici progettuali come campo di sperimentazione nel quale il design può contribuire allo sviluppo di strategie innovative sostenibili. Interpretate come sistemi progettuali complessi, le superfici possono diventare infrastrutture materiali capaci di integrare ricerca tecnologica, qualità percettive e responsabilità ambientale nello sviluppo di nuovi modelli progettuali per l'ambiente costruito.

Alla luce dei risultati emersi, la ricerca evidenzia alcune criticità che meritano approfondimento. In primo luogo si rileva uno scarto significativo tra la sperimentazione prototipale e le possibilità di trasferimento su scala industriale: se da un lato la manifattura additiva consente elevati livelli di controllo geometrico e di variabilità, dall'altro presenta ancora limiti legati ai tempi di produzione, ai costi e all'integrazione nelle filiere produttive consolidate. In secondo luogo emerge una tensione tra qualità percettive e prestazioni effettive: le superfici sviluppate mostrano un elevato potenziale nella modulazione della luce, nella variazione cromatica e nella costruzione della profondità visiva; tali qualità risultano tuttavia prevalentemente valutate in termini qualitativi e necessitano di ulteriori verifiche mediante metriche quantitative e strumenti di misurazione più avanzati.

Un ulteriore elemento critico riguarda il ruolo della modularità: sebbene essa rappresenti una strategia efficace per gestire la complessità e favorire la replicabilità dei sistemi, non garantisce automaticamente benefici in termini di sostenibilità, che dipendono invece da variabili quali i materiali, i processi produttivi e il ciclo di vita del prodotto.

In questo quadro il contributo propone una rilettura della superficie come infrastruttura progettuale intesa non come semplice esito formale, ma come dispositivo capace di integrare la generazione geometrica, il comportamento materiale e la dimensione percettiva. Tale interpretazione apre a possibili sviluppi futuri orientati all'integrazione tra modellazione parametrica, fabbricazione digitale e valutazione prestazionale, con l'obiettivo di superare la separazione ancora esistente tra le dimensioni tecnologica ed esperienziale del progetto.

In the contemporary context marked by an increasingly complex environmental, social and economic polycrisis, design is called upon to rethink production models, material infrastructures and innovation processes that characterise the built environment. The United Nations 2030 Agenda (UN, 2015) identifies Sustainable Development Goal 9 (Fig. 1) as a strategic axis for promoting resilient industries, sustainable infrastructure, and innovation systems that integrate economic development, environmental sustainability and social progress. The scientific debate points out that such transformations require systemic design approaches capable of connecting technology, production and environmental responsibility (Fig. 2).

It is against this backdrop that the evolution towards Industry 5.0 is taking place. Indeed, the transition from the Industry 4.0 paradigm to Industry 5.0 is characterised by substantial technological, organisational, and value integration, redefining the

Stage	Description	Tools	Controlled parameters	Outcome	Evaluation criteria
Design brief	Definition of basic geometries and surface patterns	Parametric modelling software (Blender and Grasshopper)	Module dimensions; pattern density; depth; surface inclination	3D digital models	Geometric consistency; morphological variability
Digital modelling	Generation of variants through parametric control	CAD software and algorithmic modelling	Number of iterations; parameter variation (density, angle, scale)	Series of digital configurations	Formal diversification; pattern legibility
Pre-processing	Converting models into files for manufacturing	Slicing software	Layer height; infill; print speed; extrusion temperature	Machine file (G-code)	File validity; manufacturability
Manufacturing	Fabrication of modules using 3D printing	FDM printer	Material (PLA); nozzle; speed; temperature	Physical prototypes	Surface quality; geometric accuracy
Perceptual tests	Analysis of light-surface interactions	Controlled lighting system	Light angle; intensity; colour temperature	Visual and perceptual variations	Shadow contrast; colour variation; perceived depth
Analysis of results	Comparison of configurations	Direct observation and photographic documentation	Constant observation conditions	Mapping of perceptual performance	Consistency between parameters and effects; repeatability

Tab. 2 | Methodological protocol for the experimental process (credit: the Authors, 2026).

role of manufacturing within socio-economic systems. If Industry 4.0 favoured vertical and horizontal integration of cyber-physical systems, IoT interconnection, and big data analysis to maximise efficiency and productivity, Industry 5.0 expands this architecture, leading to systemic integration oriented towards environmental sustainability, supply-chain resilience, and human centrality. Advanced digital technologies – including digital manufacturing – are no longer solely aimed at optimising operational performance, but are integrated with objectives of reduced environmental impact, adaptive flexibility and mass customisation.

Within this framework, additive manufacturing represents a key enabler, as it integrates generative design, distributed production and efficient use of resources, fostering circular and decentralised production models. Human-machine integration also takes on a qualitative dimension, enhancing the skills, creativity and well-being of workers, in a logic of co-creation of value that sometimes also involves the user base, enabling new modes of consumption and fruition. Design assumes a mediating role between technological research, production and society, contributing to the definition of development models in which materials, production processes and perceptual dimensions of design are considered in an integrated manner (European Commission, 2021; Maddikunta et alii, 2022). Within this framework, surfaces are progressively assuming a central role in contemporary design. Traditionally considered as finishing elements, they are now reinterpreted as active devices capable of mediating between matter, perception and environmental performance. Indeed, surface design contributes to the construction of the sensorial qualities of space, transforming the covering into a design system that integrates aesthetic, technical and communicative dimensions (Carullo and Pagliarulo, 2013; Sully, 2024). In this perspective, matter becomes a design agent capable of generating relationships between technology, perception and environment (Antonelli and Burckhardt, 2020).

Similarly, the spread of digital fabrication and additive manufacturing technologies is redefining the relationship between design and production. 3D printing allows the production of complex geometries while maintaining a strong continuity between digital model and physical artefact (Fig. 3), introducing new relational threads between design and production, where geometric complexity becomes a controllable variable and no longer an operational limitation (Gibson et alii, 2021; Thompson et alii, 2016). Several studies also highlight the growing role of additive manufacturing in industrial innovation processes and product customisation strategies, e.g. through customised design and mass customisation (Srivastava and Rathee, 2022).

These transformations are located within the so-called 'second digital turn', in which design is not limited to the formal definition of objects, but extends to the configuration of the processes that determine their production and materialisation. In this scenario, computational design and digital fabrication become complementary tools for developing design systems characterised by high morphological complexity and formal variability.

Despite the growing interest in these technologies, the scientific debate still tends to address additive manufacturing research and surface design studies separately. Thus, an integrated perspective that interprets the surface as a design system connecting production processes, morphological configuration, and perceptual experience remains underexplored. However, some studies suggest that surfaces can be interpreted as complex devices in which technological, environmental and cultural dimensions converge (Gasparini, 2023).

In light of these premises, the contribution proposes a reinterpretation of design surfaces as infrastructures of innovation capable of integrating design research, technological experimentation and sustainability. The paper presents the results of an experimental research project aimed at developing surface modules generated through parametric modelling and realised using additive manufacturing technologies. The aim is to investigate how modular design and 3D printing can contribute to the definition of variable, flexible surface systems that respond effectively to changing environmental conditions and customisable user requirements. The contribution is part of the international debate on the role of design in sustainable innovation processes and proposes a replicable methodological approach that integrates digital design, prototyping, and the critical observation of results.

State of the Art: designing surfaces, additive manufacturing, and modularity | In recent years, contemporary design has progressively redefined the role of surfaces in the built environment, overcoming the traditional view that treated them as mere finishing elements. The literature highlights how the surface can be understood as a device capable of integrating technological, environmental, and perceptual dimensions, contributing to the construction of the sensorial qualities of architectural space and industrial products (Sully, 2024).

To strengthen the theoretical framework and verify the research's positioning in the international debate, a number of recent case studies were selected that address the theme of the surface in relation to additive manufacturing, modularity, and perceptual performance. The selection was carried out according to the following criteria: a) use of digital or additive manufacturing technologies; b) presence of a modular or parametric surface system; c) integration between geometric configuration, material behaviour and perceptual qualities; d) relevance in the contemporary research or design practice landscape (Tab. 1).

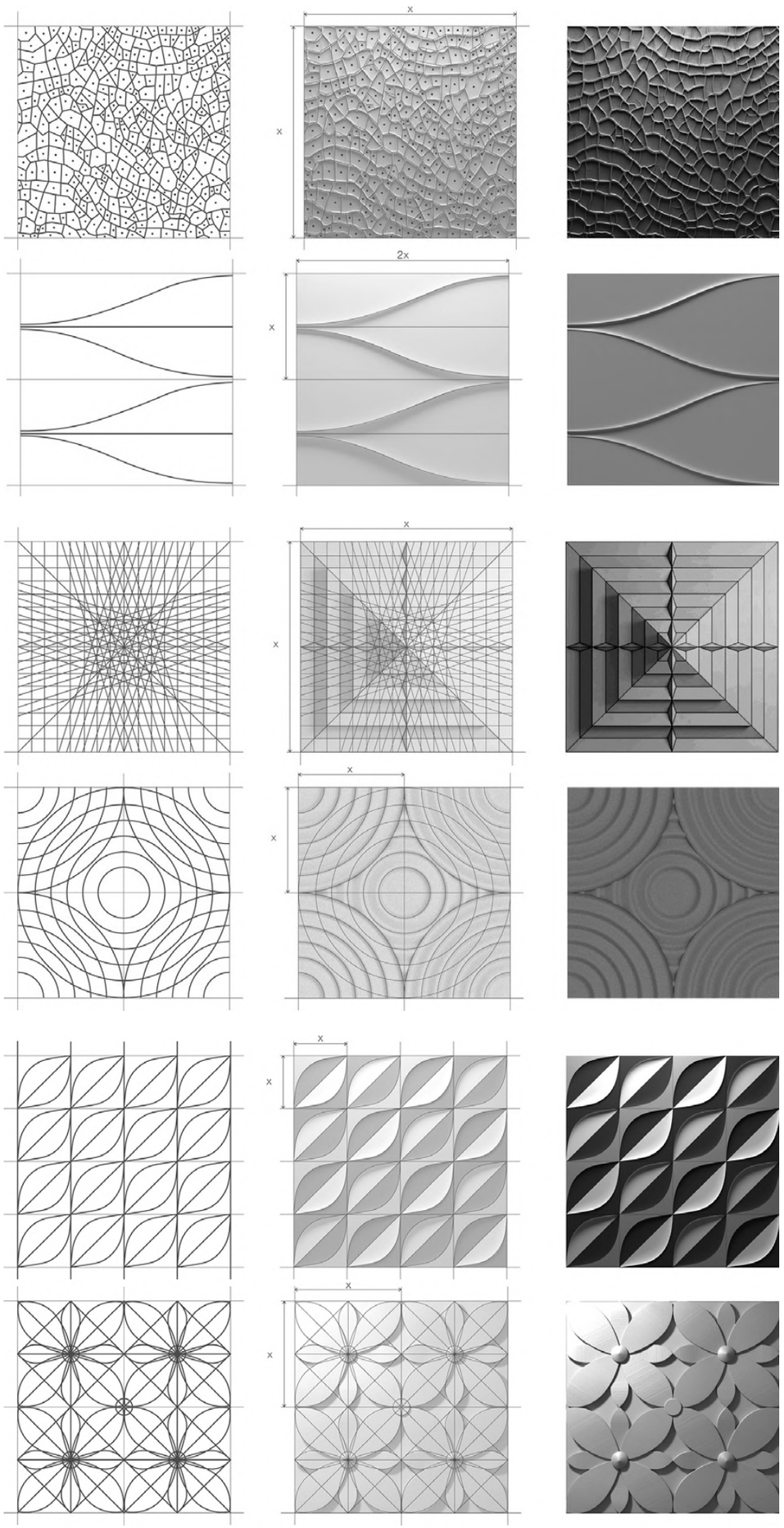
This interpretation is reflected in the case studies analysed, in which the surface does not merely mediate relationships but contributes directly to the definition of the system's performance. In particular, while the MX3D Bridge represents an example of the application of additive manufacturing mainly oriented to the structural scale, the cases of the BUGA Fibre Pavilion and sand-printed facades show a greater integration between geometry, material behaviour and perceptual qualities (Dillenburger et alii, 2018). However, a common critical issue arises regarding the transferability of the developed systems, which is often limited by high costs, complex processes, or difficulties in integrating them into traditional production chains. In this framework, modularity emerges as a key element to make such approaches more scalable, allowing mediation between design variability and constructional feasibility. In this perspective, the surface is configured as an interface between matter, the environment, and perception, assuming

an active role in spatial experience. In design and architecture, wrapping and covering represent today the point of convergence of a twofold field of interest: the first concerns the activation of the surface to enable new forms of interaction, while the second concerns its communicative dimension in visual experience. In both cases, the surface assumes a mediating role, in which technological, synaesthetic and cultural aspects coexist within the project (Dal Buono and Scodeller, 2016).

These reflections are complemented by recent studies that highlight how the perceptual properties of materials – in particular, texture, apparent naturalness, and surface configuration – significantly influence the perceived quality of interiors and users' responses. In particular, experimental research shows that surfaces characterised by greater material articulation and geometric complexity produce measurable perceptual changes in terms of visual comfort and aesthetic evaluation (Zhang, Song and Luo, 2023; Weninger et alii, 2024): such contributions reinforce the interpretation of the surface as an active device in the construction of spatial experience. In this perspective, the project can be interpreted as a device of mediation between heterogeneous variables, capable of organising complex relationships between material, technological and perceptual parameters, according to non-linear logics (Mascitti and Paciotti, 2024).

A significant part of contemporary research investigates the relationship between material design and technological innovation. The concept of 'material-driven design' has redefined the integration of materials into the design process, highlighting how the sensory and performative properties of matter can guide the development of design solutions (Karana et alii, 2015): interdisciplinary approaches such as the 'ecology of materials' (Oxman et alii, 2015) have expanded the reflection on the role of materials by integrating biological, technological and environmental dimensions into design systems. This evolution is closely linked to the development of digital technologies for design and fabrication.

In this perspective, computational modelling and parametric systems assume a central role in controlling geometric complexity and managing design variability. Recent studies highlight how the use of implicit and algorithmic models enables greater consistency between the design and additive manufacturing phases, enabling the generation of complex surfaces directly compatible with



Figg. 6-8 | Graphic development from two-dimensional geometric drawing to three-dimensional modelling in relation to digital manufacturing (credit: the Authors, 2026).

Case	Modularity	Manufacturing	Verified performance	Perceptual quality	Reproducibility / Transferability	Relevance to the present paper
3D-printed micro-perforated panels (2024)	High (variation in sub-volumes / cavities)	3D printing of micro-perforated panels	Sound absorption, numerical simulation, and impedance-tube testing	Secondary to acoustic performance	Good for acoustic applications, but dependent on instrumental testing	Shows how parametric variability can be linked to measurable performance metrics – a step only partially addressed in the present study
Adjustable acoustic metamaterial cell (2024)	Medium (repeatable unit with adjustable behaviour)	SLA 3D printing using functional magnetic resin	Adjustable resonance, vibrometry, and material characterisation	Limited (functional efficiency takes precedence)	Suitable as a proof of concept, but more complex in terms of materials and processes	It highlights a further distinction: not only geometric variation, but also post-manufacturing adaptability; the proposed method is more accessible but less responsive
3D-printed biomimetic tribological surfaces (2024)	High (a family of bio-inspired patterns)	FDM with PLA	Anisotropic friction and wear	Significant (texture and performance are closely interrelated)	Suitable for grip / interface applications	This is the closest comparison in terms of modulated texture; it suggests extending your protocol to include haptic and tribological tests
Weather-responsive hygromorphic 4D-printed shading (2024)	High (customised serial components)	FFF / 4D printing using cellulose bilayers	Temperature / humidity response, annual monitoring, and full-scale façade testing	Significant (morphological transformation also produces visual effects)	Very high, but with greater complexity in development and validation	This points to a possible development direction: from a perceptual modular prototype towards a scalable, adaptive shell tested in real-world use

Tab. 3 | Comparative summary of methodological and performance benchmarks (credit: the Authors, 2026).

manufacturing processes (Li et alii, 2018). This helps to overcome the traditional separation between form and process, integrating constructional and performance logics from the earliest design stages.

Parametric modelling tools make it possible to generate complex morphological systems with controlled variations in geometry and density, favouring the creation of surfaces capable of producing differentiated spatial effects: in this context, the so-called 'second digital turn' has redefined the relationship between design and production, extending the role of design to the configuration of the materialisation processes of the artefact (Carpo, 2017).

At the same time, the spread of additive manufacturing has introduced significant transformations in production processes, enabling the production of complex geometries that are difficult to achieve with traditional industrial methods. Indeed, 3D printing enables the production of components with high morphological complexity (Fig. 4) while maintaining continuity between the digital model and the physical artefact (Gibson et alii, 2021). Several studies also highlight the growing role of additive manufacturing in industrial innovation processes and product customisation strategies (Srivastava and Rathee, 2022; Bollzan, 2020).

Further contributions highlight how additive manufacturing is progressively evolving from a prototyping technology to an advanced manufacturing system, capable of affecting product development models, customisation and geometric complexity management. In particular, systematic reviews on the topic emphasise how 3D printing allows the integration of form, function and performance in a single process, opening up new possibilities for the design of articulated and performative surfaces (Ngo et alii, 2018). At the same time, critical issues related to cost, production time, and industrial scalability emerge, necessitating an integrated assessment between formal potential and production conditions (Yang and Zhao, 2015).

In the field of architecture and design, these transformations have favoured research oriented towards experimenting with modular components and systems. In this perspective, modularity cannot be interpreted exclusively as a principle of seriality, but as a strategy for managing the complexity and adaptability of envelope systems, capable of integrating variability, performance and design control (Manni and Valzano, 2023). In this context, recent research shows that integrating parametric design, digital fabrication, and modular construction enables the transfer of design variability into buildable, assemblable systems even at the architectural scale. Studies show that the combination of modular components and additive processes enables the realisation of complex structures while maintaining high levels of geometric control and adaptability (Su et alii, 2023). In parallel, the use of materials as design tools highlights the possibility of integrating performance, sustainability and expressiveness within a single system, reinforcing the role of design in managing complexity (Dahy, 2023). Other studies have explored the use of 3D printing for the realisation of architectural elements with integrated performance (Doubrovski, Verlinden and Geraedts, 2012), while still others have investigated programmable materials and adaptive building systems (Correa et alii, 2023; Morbiducci, Polverino and Battaglia, 2023). There is also no shortage of recent studies highlighting the role of digital fabrication in integrating technological innovation and sustainability into architectural processes (Dahy, 2023).

The relationship between modularity and sustainability thus rightfully enters the debate on the transition towards circular economy models: modular design is considered a strategy capable of increasing the durability of products and facilitating maintenance, repair and remanufacturing (Pietroni, Di Stefano and Galloppo, 2023), contributing to the reduction of resource consumption (EMF, 2021) and to the development of non-linear, iterative consumption and management practices.

In this direction, research on responsive architecture highlights how system intelligence can be incorporated directly into matter and geometric configuration, reducing dependence on active technological systems and favouring passive, low-energy strategies (Holstov, Bridgens and Farmer, 2017), while studies on the use of additive manufacturing show how the effectiveness of such technologies depends on their integration within coherent production, decision-making and design systems, in which modularity, materials and environmental objectives are considered within an integrated perspective (Raffaeli et alii, 2021). Alongside technological issues, the complexity of contemporary design systems emerges, characterised by interactions between technical, environmental and social factors that require interdisciplinary approaches (Porfirione, Ferrari Tumay and Leggiero, 2024): in this context, design can be interpreted as a mediating practice between actors, technologies and production processes (Celaschi, Casoni and Formia, 2024), while studies on circular transition highlight the involvement of different actors along the industrial supply chain (Maffei et alii, 2024). Despite the increasing popularity of research on digital fabrication and surface design, the literature shows little systematic integration across studies on surfaces, modularity, and additive manufacturing. In particular, while the literature on additive manufacturing emphasises the opportunities related to geometric freedom and customisation, and studies on perception highlight the importance of material and surface qualities in defining spatial experience, there remains a lack of fully integrated thinking that links these areas within a single methodological framework.

This mismatch highlights the need to consider the surface as design infrastructure, capable of connecting digital processes, modular organisation, and perceptual behaviour (Scala, 2023).

Methodology and research phases | The research falls within the field of 'design research' applied to material and technological experimentation and adopts an iterative methodological approach that integrates parametric design, digital fabrication and critical observation of prototypes. The approach is based on the 'research-through-design' paradigm, in which knowledge emerges through the design process and the production of experimental artefacts capable of verifying relationships between form, material, and perceptual performance (Frayling, 1994; Zimmerman, Stolterman and Forlizzi, 2010). In this framework, design becomes an investigation tool based on succes-

sive cycles of design, prototyping and validation, aimed at producing a open, replicable production model that can be updated and refined.

The methodological objective is to explore the potential of additive manufacturing in the design of modular surface systems characterised by controlled variations in geometry and depth. The hypothesis assumes that the combination of parametric design and 3D printing can favour variable seriality systems, in which modularity does not coincide with the identical repetition of elements, but rather with the controlled variation of design parameters. This approach is consistent with Design for Additive Manufacturing approaches (Fig. 5), which propose integrating additive manufacturing logic from the earliest design stages (Thompson et alii, 2016).

The research protocol was articulated as a sequence of steps linking digital design, physical prototyping, and result analysis. The first phase involved defining a parametric system for generating surface modules with controlled morphological variations. Starting from a basic geometric matrix, design parameters were identified that could influence module configuration, including relief depth, texture density, and surface inclination. The manipulation of these parameters made it possible to generate a family of modules that are different yet attributable to the same generative logic, whose combinatorial association allows the entire surface, understood as an ensemble, to acquire its own physical and semantic value.

The second phase involved materialising the digital models using additive manufacturing technologies. The modules were produced by 3D printing using FDM (Fused Deposition Modelling), a technology that deposits layers of thermoplastic material from 3D models. The prototypes were made from PLA, with thicknesses ranging from 0.1 to 0.2 mm and infill values of 15% to 30%, depending on the modules' morphological characteristics. The choice of this technology is linked to its widespread use in design prototyping and to its ability to produce complex components, as also highlighted in the literature on the role of 3D printing in the development of flexible production models (Bollzan, 2020).

Once the prototypes had been realised, the third phase aimed to study the aggregate configurations of the modules and the perceptual implications for users and exhibition environments. The observation was conducted by simulating different lighting conditions and comparing the configurations obtained by combining the modules. The focus was on the relationship between surface morphology, shadow behaviour and visual perception of textures, in continuity with studies investigating the role of matter in the construction of the sensory experience of space (Karana et alii, 2015).

The final phase involved systematising the results and defining a repertoire of modular assemblages, each composed of the developed modules. This repertoire represents an open system of design possibilities and demonstrates how variable seriality can generate differentiated surfaces from a limited number of components. The research, therefore, proposes a replicable methodological approach that integrates parametric design and additive manufacturing as tools for surface design experimentation. To ensure the replicability of the experimental process, a summary of the methodological protocol adopted is provided, broken down into inputs, tools, parameters, outcomes and evaluation criteria (Tab. 2).

To strengthen the methodological positioning of the research, the developed protocol was compared with several recent international cases on additive performative surface systems, parametric-functional configurations, and adaptive envelopes. The cases were selected not so much for formal affinity as for the comparability of the experimental device: in all of them, an operational chain is recognisable that links the parametric definition of the geometry, materialisation through additive processes and the verification of a measurable performance. In this sense, the comparison clarifies the strengths, limitations, and transferability of this contribution.

A first group of precedents concerns additive surfaces with high acoustic performance. In the study of 3D-printed micro-perforated panels with multiple cavities, the systematic variation of geometrical parameters such as pore diameter, perforation ratio, thickness and depth of back cavity was verified through numerical simulation and technical testing in an impedance tube, showing that the

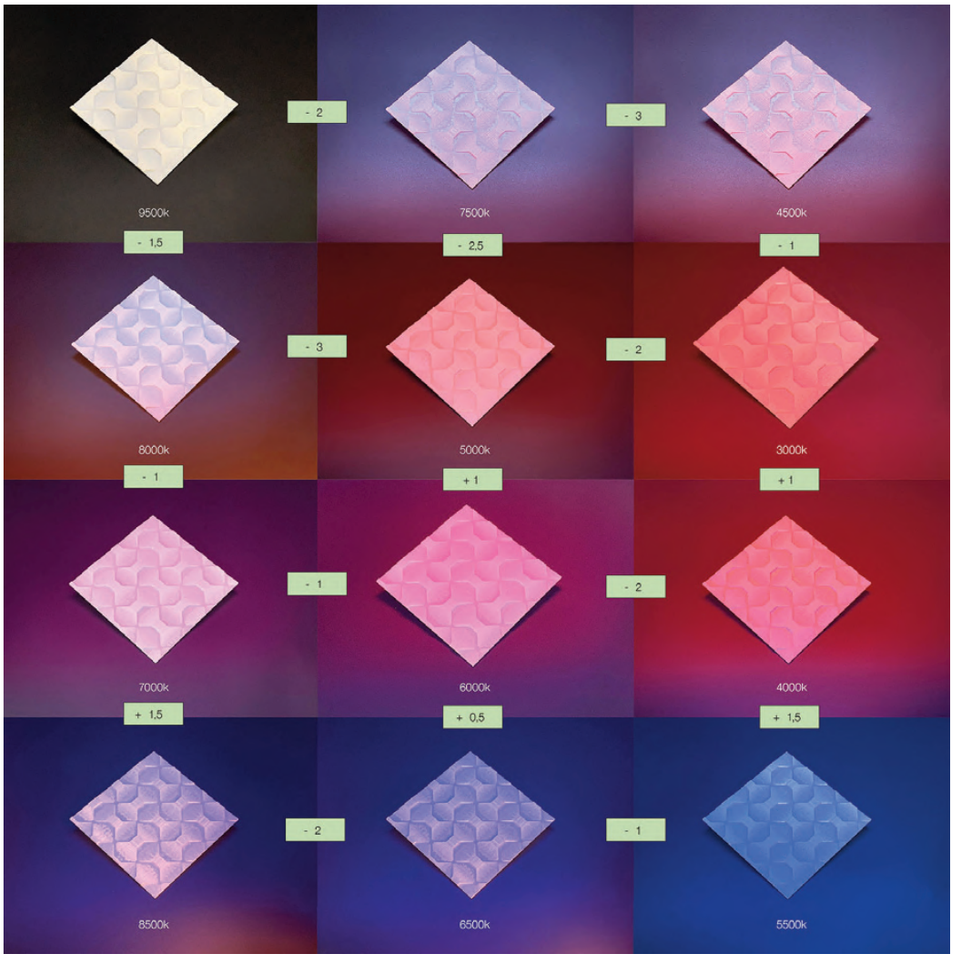


Fig. 9 | Results of the variation of light incidence versus Kelvin degrees in relation to surface texture (credit: the Authors, 2026).

parametric differentiation of the modules can produce a broader bandwidth and more controlled absorption than in uniform systems (Deepak et alii, 2024).

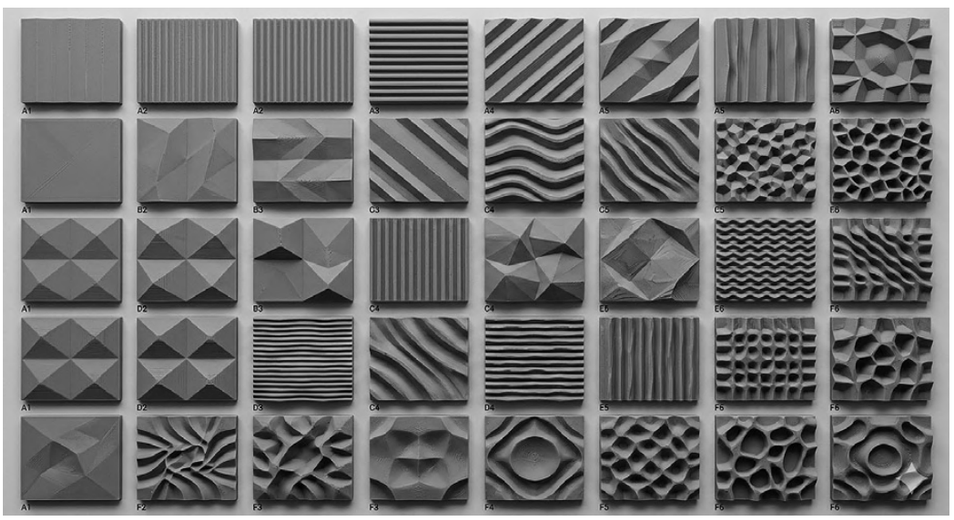
Here, the most methodologically relevant element is that variability is not treated as a mere aesthetic outcome, but as a performance device that can be verified through predominantly quantitative observation. At the same time, this reference highlights an initial difference in development and a limitation of the research presented here: while the protocol adopted accurately analyses the perceptual effects of light, shadow and texture through an empirical and predominantly qualitative experimental approach, it does not yet integrate a phase of instrumental measurement of the functional performance of the surface. It follows that the paper's contribution is, at present, more solid on the morphological-perceptual level than on the metrological-performance level, and that the research requires further development oriented towards the collection of analytical data through instrumental observation.

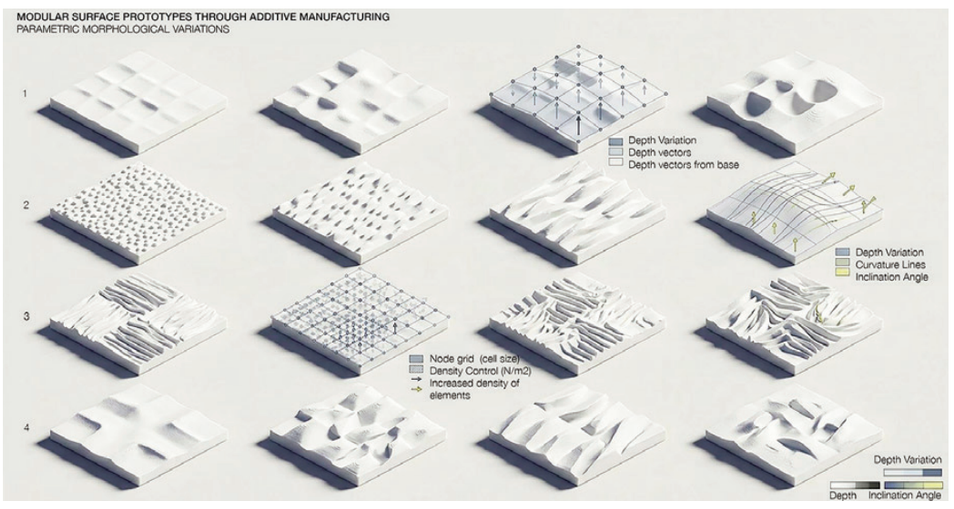
A second reference is research on fully adjustable, 3D-printed acoustic metamaterials, such as the SLA resonant cell with magnetic membrane, which can change the resonance frequency after fabrication (Gardiner et alii, 2024). Here, the point of interest is not only the printing of a complex geometry, but the integration of additive manufacturing, the functionalised material and the adaptive behaviour of the component. With respect to this line of research, the contribution proposed here shares the idea of an open generative geometry and non-standardised production, but differs from it in that it works on a 'weak' adaptivity, relying on module recombination and contextual perceptual effects, not on an active or post-fabrication transformation of the component (Figg. 6-8). The comparison thus makes explicit that the method's transferability is high for static or semi-variable modular surfaces, whereas it remains limited for truly responsive or reconfigurable systems in operation.

A third field of comparison concerns biomimetic surfaces oriented towards grip and tribological response. A recent study on bioinspired PLA textures 3D-printed with FDM (Fused Deposition Modelling) technology investigated five textures derived from natural models and verified their behaviour in terms of anisotropic friction and wear through mutual sliding tests. In this case, as in the present research, the surface is understood as an active interface between geometry and behaviour, but the experimental procedure shifts from a predominantly visual-perceptual observation to a quantitative characterisation of the mechanical interaction (comparable to the first case study cited above). The parallelism is particularly useful because it still shows a possible methodological extension of the protocol adopted here: the parameters used today to modulate relief depth, texture density and surface inclination could also be related, in subsequent studies, to coefficients of friction, haptic comfort or wear resistance, expanding the transferability of the system to applications where tactile or grip performance is central (Mzali et alii, 2024). A fourth point of comparison is offered by the most recent studies on 4D-printed adaptive envelopes, in particular the bio-based hygromorphic shading system developed for a real façade, in which two-layer cellulosic structures made using FFF (Fused Filament Fabrication) technology were tested in the laboratory, monitored for over a year under real weather conditions and then brought to architectural scale. This case is particularly relevant because it demonstrates a methodological advancement in laboratory prototyping: the design-fabrication-test cycle does not stop at sample verification, but also includes robustness tests, weathering behaviour verification, transfer to architectural scale, and on-site demonstration.

Compared with this case study, the research presented here is distinguished by the construction of an open repertoire of assemblies and the definition of a replicable modular grammar. However, validation of the results is still mainly at the prototypical and perceptual-environmental levels. The comparison, therefore, points to the extension of the protocol to durability tests, tests under conditions of use and application-scale tests as a necessary further development to strengthen its scientific contribution.

Taken together, these precedents make it possible to better specify the specific contribution of this research, the strength of which lies not in introducing a new technical performance in the strict sense, but rather in proposing a replicable method for constructing modular surfaces with variable seriality, in which additive manufacturing is assumed to be the condition that makes the controlled articulation of difference possible. Compared to the most advanced performance cases, the study offers greater technological accessibility – thanks to the use of FDM and PLA, processes widely used in design prototyping – and a more immediate transferability to the fields of interior design, outfitting, and perceptual surface qualification devices. On the other hand, its replicability is nowadays mainly procedural and geometric, while full transferability





Figg. 10, 11 | Prototypes of modular surfaces made by 3D printing and used for design experimentation. Starting with a basic geometric matrix, the modules were developed through controlled parametric variations of depth, slope and texture density. The combination of these parameters generates morphological configurations capable of producing different visual and perceptual effects under different lighting conditions and observer positions (credits: the Authors, 2026).

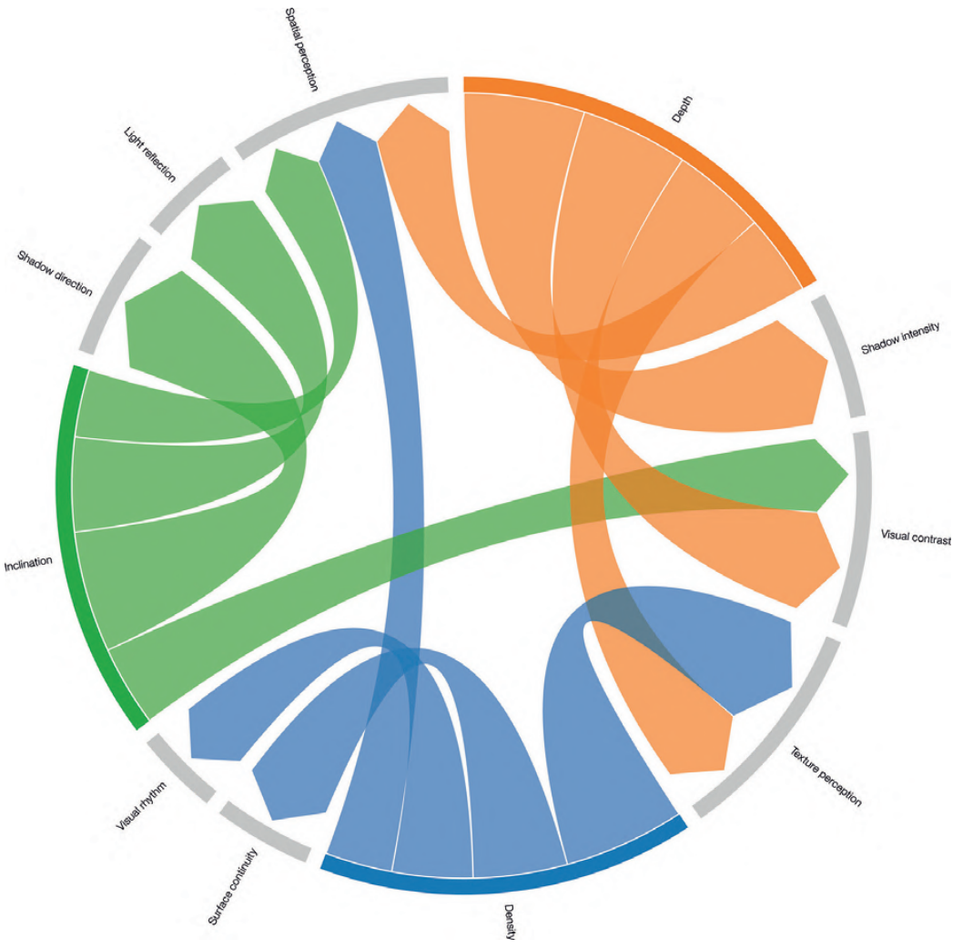


Fig. 12 | Diagram of the relationships between surface geometrical parameters (depth, density, and slope) and the perceptual effects generated, highlighting the role of morphological variations in modulating the visual perception of surfaces (credit: the Authors, 2026).

to high-performance fields requires the integration of quantitative metrics, standardised test protocols, and verification at the scale of use (Tab. 3).

Comparison with recent cases confirms that the present research aligns with studies that use additive manufacturing not only to produce formal complexity, but also to build verifiable relationships between geometric parameters, surface behaviour, and quality of experience. Within this framework, the specific contribution of the work is to define a replicable protocol for modular surfaces with variable seriality, with further evolution potentially including the integration of quantitative performance metrics and validation at the application scale.

Experimental results | To verify the relationship between morphological configurations and perceptual effects, specific evaluation criteria were defined and systematically applied to the developed prototypes. The metrics adopted, mainly qualitative but structured around controlled parameters, enable comparison of different configurations with respect to the perceptual performance resulting from the interaction between light and surface.

The main evaluation metrics are as follows:
a) light-shadow contrast – ability of the surface to generate perceptual differences between illuminated and shaded areas, in relation to the depth and inclination of the surface articulation;
b) perceived colour variation – change in colour perception as a function of surface orientation and lighting conditions;
c) visual depth – degree of perceived three-dimensionality of the surface, related to the layering of levels and geometric complexity;
d) legibility of the texture – clarity and recognisability of the geometric configuration with respect to the distance and angle of observation;
e) perceptual variability – ability of the modular system to generate different effects from controlled parametric variations.

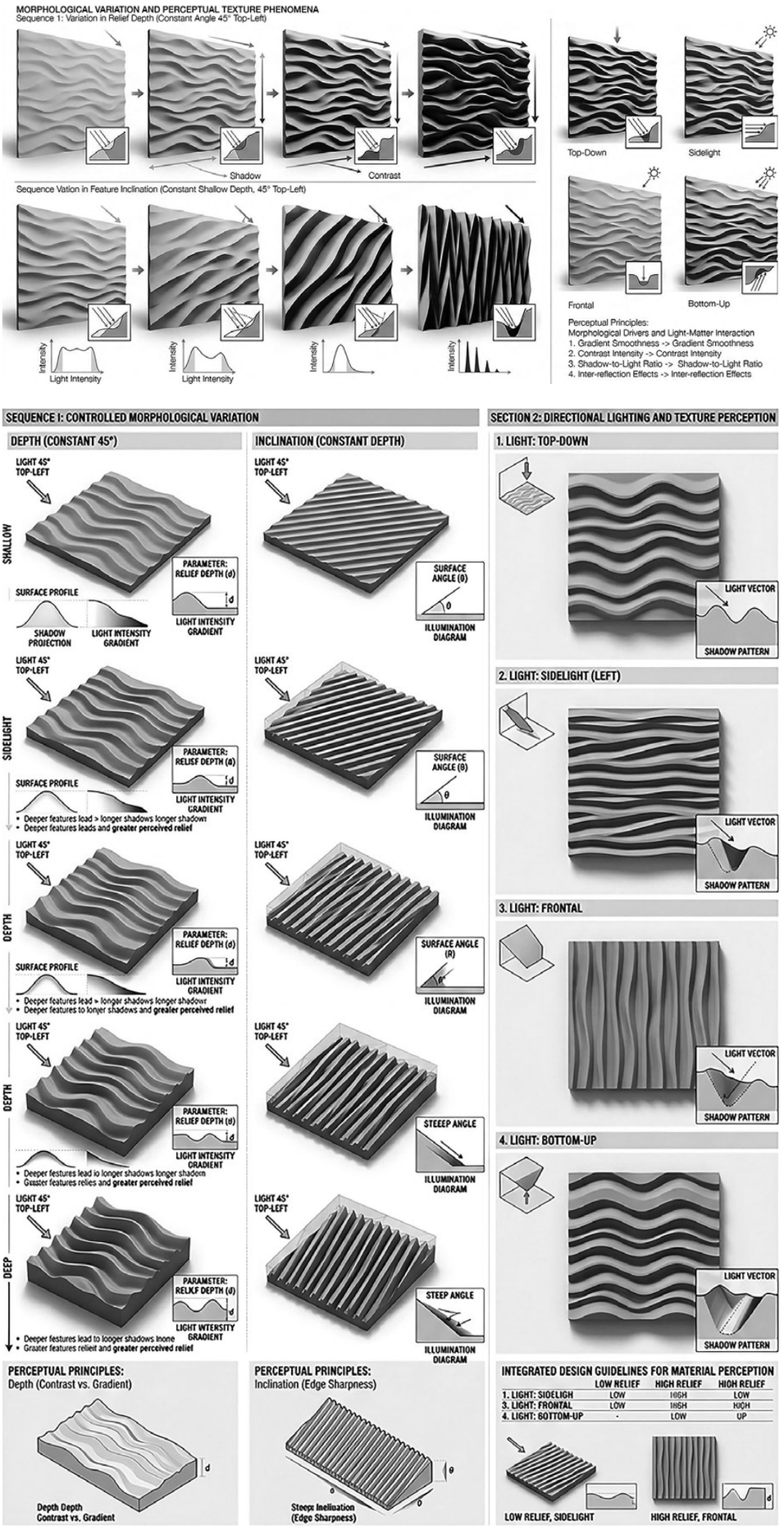
The study was conducted with lighting and observation conditions held constant to ensure comparability of the results, while the analysis of the prototypes used the metrics described above to systematically correlate parametric variations with the perceptual effects observed. In particular, configurations characterised by greater surface depth and inclination showed a significant increase in light-shadow contrast and visual depth, while those with higher density showed a reduction in legibility but an increase in perceptual variability (Fig. 9).

The experimentation enabled the development of a wide repertoire of formal/functional solutions, characterised by controlled variations in form, achieved through the parametric manipulation of certain fundamental geometric features (Figg. 10, 11). Starting from a basic design matrix, modules were produced with variations in depth, light incidence and material density, the combination of which generated different perceptual effects depending on lighting conditions and scale. The 3D-printed prototypes demonstrated that additive manufacturing allows a strong continuity between digital modelling and physical production. The ability to produce complex components without the use of moulds or subtractive machining enabled high fidelity between the designed geometry and the resulting material, confirming the role of additive manufacturing in design experimentation processes (Gibson et alii, 2021).

The results confirm the consistency between the design hypotheses and the observed effects, highlighting the role of parametric variation as a means of controlling perceptual performance. The modules developed can be combined to generate different surface configurations while maintaining an overall morphological coherence. This approach can be interpreted as a form of 'flexible seriality', in which modular repetition does not coincide with the identical replication of elements, but rather with the controlled variation of each unit's physical characteristics.

This strategy redefines the meaning of the surface, attributing to it dynamic qualities not usually found in the fields of product and architectural design, qualities that are all the more sustainable and effective the more they correspond to the changing needs of reconfiguration in time and space of the surface itself. Indeed, modularity enables the replacement or reconfiguration of individual components without compromising the entire system, thereby extending product life cycles and reducing resource consumption (Pietroni, Di Stefano and Galloppo, 2023).

From a perceptual point of view, the analysis of the prototypes showed how variations in the



depth and inclination of surfaces produce different effects in the distribution of shadows and the visual perception of textures (Fig. 12). The generated configurations show how small geometric variations can also produce significant effects on the optical and, potentially, acoustic behaviour of surfaces, suggesting the possibility of using these parameters as design tools to modulate the sensory qualities of space (Figg. 13, 14).

Limitations and implications for the project | Although the results highlight the potential of combining parametric design and additive manufacturing for the development of modular surface systems, the research still has limitations that need to be considered for the full transferability of the results. In fact, the experimentation was conducted in a prototype context, in which the modules were manufactured with materials and technologies for 3D printing that are mainly used for research purposes; although these technologies allow for the exploration of complex formal configurations and variable modular systems, the transition to the industrial scale requires further investigation into production costs, manufacturing times and the physical-mechanical performance of the materials.

It should also be noted that the still early level of maturity of the research conducted suggests the appropriateness of a metrological analysis (e.g. optics, acoustics, lighting engineering) of the visual and environmental effects produced through the control of design parameters related to the design of the individual module, the construction and repetition of surface geometries, as well as the transformation of the surface itselfs due to processes of modular substitution or chronological metamorphosis. The literature also notes that the transition from prototyping to industrial production is one of the main challenges to the widespread adoption of additive manufacturing. Although 3D printing enables the production of highly geometrically complex components, its integration into production chains requires a rethinking of design and organisational logic, in which design plays a mediating role between technological research, production, and innovation.

A further limitation concerns the assessment of the environmental and social impacts of the design systems developed: the modularity and reconfigurability of components can contribute to extending the life cycle of products; however, the measurement of environmental benefits requires more structured analysis protocols based on Life

Figg. 13, 14 | Perceptual effects generated by morphological variation of surfaces and light distribution on three-dimensional textures. Differences in relief depth and slope influence shadow formation and the visual perception of surfaces, producing different perceptual configurations depending on the direction and intensity of illumination (credits: the Authors, 2026).

Cycle Assessment methodologies and integrated approaches to assessing impacts on the biosphere (Sposito and De Giovanni, 2023).

Alongside technological barriers, cultural and organisational barriers also emerge that may influence the diffusion of design approaches based on digital manufacturing. Indeed, the transition towards more sustainable production models requires the involvement of various actors along the entire industrial chain and can be slowed down by economic, regulatory and organisational factors (Maffei et alii, 2024).

Despite these critical issues, the results suggest some directions for transferability. The modular surface system based on variable seriality can be applied in various design fields, including interior design, architecture and product design. At the same time, the methodological approach based on the integration of parametric design and digital fabrication can be replicated in other contexts of design experimentation.

Overall, the research highlights the potential of design as a discipline capable of connecting technological innovation and sustainability in the transformation processes of the built environment (Fig. 15). This objective is achieved through an experimental approach, rapidly oriented towards comparison and its transfer into the fields of material production.

Relation to the Sustainable Development Goals | The research fits into the framework of the UN Sustainable Development Goals (SDGs), contributing in particular to SDG 9 (Industry, Innovation and Infrastructure), SDG 11 (Sustainable Cities and Communities) and SDG 12 (Responsible Consumption and Production). In relation to SDG 9, the integration of parametric modelling, additive manufacturing and surface design highlights the potential of digital technologies as tools for innovation in design and production processes.

With regard to SDG 11, the contribution proposes a reflection on the role of surfaces as active devices in defining the perceptual quality of spaces, with possible repercussions on the well-being of users and on the quality of the built environment; in this sense, the research suggests a perspective in which surfaces are not only finishing elements, but components capable of affecting spatial and relational dynamics. In relation to SDG 12, the adoption of modular logic and additive manufacturing processes opens up opportunities for greater resource efficiency, reduced waste, and optimised



Fig. 15 | Samples for the study tests carried out in the laboratory by means of rapid prototyping Fused Deposition Modelling in PLA (credit: the Authors, 2026).

production processes. However, these benefits depend strictly on the application conditions, in particular the choice of materials, energy consumption, and production scale.

In addition to direct benefits, the research develops indirect synergies with other goals, including SDG 13 (Combating climate change), in relation to the potential for waste reduction and process optimisation, and SDG 8 (Decent work and economic growth), in relation to the development of new skills and production chains related to digital manufacturing.

At the same time, possible trade-offs and critical issues emerge. In particular, the adoption of additive manufacturing may increase energy consumption and production costs, limiting its actual sustainability if not integrated into optimised supply chains. Furthermore, the complexity of the processes and skills required may constitute a barrier to large-scale diffusion, affecting the real transferability of the proposed models. In this perspective, the contribution highlights how the effectiveness of design strategies based on modular surfaces and digital fabrication depends on specific contextual conditions, including access to technologies, the organisation of the supply chain, and the integration between design, production, and lifecycle management.

Conclusions | One of the main contributions of the research is to propose a design approach based on variable seriality, in which modularity does not coincide with the identical repetition of components, but rather with the controlled variation of shared morphological parameters. This approach enables the generation of multiple configurations from a limited number of modular elements, expanding the project's expressive and functional possibilities. In this sense, additive manufacturing is configured as a design tool capable of supporting the development of complex systems in which design and production are closely integrated (Thompson et alii, 2016).

From a theoretical perspective, the contribution fits into the international debate on the transformation of design processes in the age of digital manufacturing. The so-called 'second digital turn' has redefined the relationship between design and production, enabling the development of systems characterised by high morphological complexity and continuity between computational modelling and the materialisation of the artefact. In this scenario, design plays an increasingly important role as a discipline capable of mediating between technological innovation, production processes, and the project's cultural dimensions.

A further contribution concerns the possibility of interpreting modular surface systems as design devices consistent with the principles of the circular economy. The modularity and reconfigurability of components can extend the life cycle of design systems, facilitate maintenance, replacement, and reuse, and reduce resource consumption, thereby favouring the development of more sustainable production models.

In light of these considerations, the contribution relates to the Sustainable Development Goals of the 2030 Agenda, in particular to Goal 9, which promotes resilient industries, sustainable infrastructure and innovation systems. The integration of digital design, additive manufacturing and modularity strategies can contribute to the development of more flexible and adaptive production models, generating synergies also with Goal 12 on responsible production and consumption and Goal 11 on sustainable cities and communities.

Despite the results, the research opens up further development prospects. It will be necessary to develop more systematic evaluation protocols to analyse the environmental and social impacts of the design systems developed, integrating life-cycle analysis methodologies and environmental performance assessment tools. At the same time, it will be appropriate to investigate the conditions that may favour the transfer of results from the experimental to the industrial scale. Overall, the research highlights the potential of design surfaces as a field of experimentation in which design can contribute to the development of sustainable innovation strategies. Interpreted as complex design systems, surfaces can become material infrastructures capable of integrating technological research, perceptive qualities and environmental responsibility in the development of new design models for the built environment.

In light of the results, the research highlights critical issues that warrant further investigation. Firstly, there is a significant gap between prototype experimentation and the potential for transfer to industrial scale: while additive manufacturing enables high levels of geometric control and variability, it still presents limitations related to production times, costs, and integration into established production chains. Secondly, a tension emerges between perceptual qualities and actual performance: developed surfaces show a high potential for light modulation, colour variation, and the construction of visual depth; however, these qualities are predominantly evaluated qualitatively and require further verification using quantitative metrics and more advanced measuring instruments.

A further critical element concerns the role of modularity. Although it represents an effective strategy to manage complexity and promote the replicability of systems, it does not automatically guarantee sustainability benefits, which instead depend on variables such as materials, production processes and product life cycle.

In this framework, the contribution proposes a reinterpretation of the surface as a design infrastructure, understood not as a simple formal outcome but as a device capable of integrating geometric generation, material behaviour, and the perceptual dimension. This interpretation opens up possible future developments oriented towards integrating parametric modelling, digital fabrication, and performance evaluation, with the aim of overcoming the separation that still exists between the technological and experiential dimensions of design.

Acknowledgements

The research is part of the broader framework of studies entitled Sensorial Surface Design, developed within the laboratories of the Design Campus of the University of Florence. The research activity was conducted from 2023 to 2025 and is ongoing. The study was conducted within an academic research context and did not receive specific external funding. The research was developed within the Models for Design Laboratory (LMD) and the Lighting Colour Surface Lab through integrated research, teaching, and prototype experimentation, with a focus on integrating digital fabrication, surface design, perceptual studies, and material innovation.

The same research has seen the involvement of the research group (University of Tuscia) UNISOL (Universal Natural Interdisciplinary Study on daylighting), of which Dr. J. Filieri is the Scientific Coordinator; in particular, the research group has conducted a study on the inferential effects of natural light in the built environment and in indoor living contexts, through customised artificial intelligence algorithms.

All the Authors contributed to the definition of the theoretical framework, the development of the research and the drafting of the contribution. The experimental phase, which involved modelling, prototyping and testing, was carried out collaboratively as part of the laboratory activities. The contribution is the result of a joint reflection by the Authors. Nevertheless, the paragraphs 'Introduction' and 'Conclusions' are to be attributed to G. Alfarano; 'State of the Art: designing surfaces, additive manufacturing, and modularity' and 'Experimental results' to A. Spennato; 'Methodology and research phases' and 'Limitations and implications for the project' to J. Filieri.

References

Antonelli, P. and Burckhardt, A. (2020), *The Neri Oxman Material Ecology Catalogue*, The Museum of Modern Art, New York (NY).

Bollzan, P. (2020), *Design e tecnologie additive – Processi di materializzazione del progetto*, Aracne Editrice, Roma.

Carpo, M. (2017), *The Second Digital Turn – Design beyond intelligence*, MIT Press, Cambridge (MA).

Carullo, R. and Pagliarulo, R. (2013), *Interior Design – Action on surfaces – Softness*, Rubbettino Editore, Catanzaro.

Celaschi, F., Casoni, G. and Formia, E. (2024), "La mediazione del Design – L'integrazione tra agenti artificiali autonomi, produzione manifatturiera e servizi | The mediation of Design – The integration between autonomous artificial agents, manufacturing production, and services", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 16, pp. 334-343. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/16282024 [Accessed 23 March 2026].

Correa, D., Bianconi, F., Filippucci, M. and Pelliccia, G. (2023), "Pattern modulari nel design igroscopico con stampa 4D – Forma e programmazione del materiale | Modular pattern in hygroscopic 4D printing design – Form and programming of the material", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 14, pp. 264-273. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/14222023 [Accessed 23 March 2026].

Dahy, H. (2023), "Materials as design tool – Digital fabrication strategies for sustainable architecture", in *Technology | Architecture + Design*, vol. 7, issue 2, pp. 153-158. [Online] Available at: doi.org/10.1080/24751448.2023.2245707 [Accessed 23 March 2026].

Dal Buono, V. and Scodeller, D. (2016), "Intergumentary

Design – Involucri sensibili e sinestesie di superficie", in *MD Journal*, vol. 1, pp. 14-19. [Online] Available at: mdj.materialdesign.it/index.php/mdj/article/view/54/37 [Accessed 23 March 2026].

Doubrovski, Z., Verlinden, J. C. and Geraedts, J. M. P. (2012), "Optimal design for additive manufacturing – Opportunities and challenges", in *Proceedings of the ASME 2011 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, Washington DC, USA, August 28-31, 2011*, American Society of Mechanical Engineers, New York (NY), article DETC2011-48131, pp. 635-646. [Online] Available at: doi.org/10.1115/DETC2011-48131 [Accessed 23 March 2026].

Deepak, Pitchaimani, J., Nadimpalli, R. and Mailan Chinnapandi, L. B. (2024), "Exploring the acoustic potential of 3D printed micro-perforated panels – A comparative analysis", in *Heliyon*, vol. 10, issue 7, article e28612, pp. 1-19. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e28612 [Accessed 10 April 2026].

EMF – Ellen MacArthur Foundation (2021), *Completing the picture – How the circular economy tackles climate change*. [Online] Available at: ellenmacarthurfoundation.org/completing-the-picture [Accessed 23 March 2026].

European Commission – Directorate-General for Research and Innovation (2021), *Industry 5.0 – Towards a sustainable, human-centric and resilient European industry*, Publications Office of the European Union, Luxembourg. [Online] Available at: doi.org/10.2777/308407 [Accessed 23 March 2026].

Frayling, C. (1994), "Research in art and design", in *Royal College of Art Research Papers*, vol. 1, issue 1, pp. 1-5. [Online] Available at: researchonline.rca.ac.uk/384/ [Accessed 23 March 2026].

Gardiner, A., Domingo-Roca, R., Windmill, J. F. C. and Feeney, A. (2024), "An adjustable acoustic metamaterial cell using a magnetic membrane for tunable resonance", in *Scientific Reports*, vol. 14, issue 1, article 15044, pp. 1-10. [Online] Available at: doi.org/10.1038/s41598-024-65819-2 [Accessed 10 April 2026].

Gasparini, K. (2023), "Design litico e manifattura additiva – Un connubio possibile per l'economia circolare | Lithic Design and additive manufacturing – A feasible partnership for the circular economy", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 14, pp. 316-325. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/14272023 [Accessed 23 March 2026].

Gibson, I., Rosen, D., Stucker, B. and Khorasani, M. (2021), *Additive manufacturing technologies*, Springer, Cham. [Online] Available at: doi.org/10.1007/978-3-030-56127-7 [Accessed 23 March 2026].

Holstov, A., Bridgens, B. and Farmer, G. (2017), "Sustainable Materialisation of Responsive Architecture", in *Sustainability*, vol. 9, issue 3, article 435, pp. 1-20. [Online] Available at: doi.org/10.3390/su9030435 [Accessed 10 April 2026].

Karana, E., Barati, B., Rognoli, V. and Van der Laan, A. Z. (2015), "Material Driven Design (MDD) – A method to design for material experiences", in *International Journal of Design*, vol. 9, issue 2, pp. 35-54. [Online] Available at: ijdesign.org/index.php/IJDesign/article/view/1965/693 [Accessed 23 March 2025].

Li, Q., Hong, Q., Qi, Q., Ma, X., Han, X. and Tian, J. (2018), "Towards additive manufacturing oriented geometric modeling using implicit functions", in *Visual Computing for Industry, Biomedicine, and Art*, vol. 1, issue 9, pp. 1-16. [Online] Available at: doi.org/10.1186/s42492-018-0009-y [Accessed 10 April 2026].

Maddikunta, P. K. R., Pham, Q.-V., Prabadevi, B., Deepa, N., Dev, K., Gadekallu, T. R., Ruby, R. and Liyanage, M. (2022), "Industry 5.0 – A survey on enabling technologies and potential applications", in *Journal of Industrial Information Integration*, vol. 26, article 100257, pp. 1-19. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.jii.2021.100257 [Accessed 23 March 2025].

Maffei, S., Bolzan, P., Bianchini, M., Zeccara, F., Barbero, S., Campagnaro, C., Di Prima, N., Filippini, A., Puglielli, M., Rosato, L., Lotti, G. and Pontillo, G. (2024), "Svelare la complessità della transizione circolare per il settore del mobile imbottito | Unveiling the complexity of circular transition for the upholstered furniture sector", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 16, pp. 304-313. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/16252024 [Accessed 23 March 2026].

Manni, V. and Valzano, L. S. (2023), "Modularità e architettura adattiva – Una strategia per la gestione di sistemi d'involucro complessi | Modularity and adaptive architecture – A strategy for managing complex envelope systems", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 14, pp. 134-151. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/14112023 [Accessed 10 April 2026].

Mascitti, J. and Paciotti, D. (2024), "Verbal Design Modelling – Complessità, IA e innovazione di prodotto | Verbal Design Modelling – Complexity, AI and product innovation", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 16, pp. 344-353. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/16292024 [Accessed 10 April 2026].

Morbiducci, R., Polverino, S. and Battaglia, C. (2023), "Stampa 4D per componenti costruttivi modulari – Applicazioni e principali sviluppi | 4D Printing for modular construction components – Applications and main developments", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 14, pp. 182-193. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/14152023 [Accessed 23 March 2026].

Mzali, S., Elwasli, F., Mezlini, S., Hajlaoui, K. and Alrasheedi, N. H. (2024), "Tribological behavior of 3D printed biomimetic surfaces", in *Tribology International*, vol. 193, article 109352, pp. 1-13. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.triboint.2024.109352 [Accessed 10 April 2026].

Ngo, T. D., Kashani, A., Imbalzano, G., Nguyen, K. T. Q. and Hui, D. (2018), "Additive manufacturing (3D printing) – A review of materials, methods, applications and challenges", in *Composites Part B – Engineering*, vol. 143, pp. 172-196. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.02.012 [Accessed 10 April 2026].

Oxman, N., Ortiz, C., Gramazio, F. and Kohler, M. (2015), "Material ecology", in *Computer-Aided Design*, vol. 60, pp. 1-2. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.cad.2014.05.009 [Accessed 10 April 2026].

Pietroni, L., Di Stefano, A. and Galloppo, D. (2023), "Il design modulare verso l'economia circolare – Dal fare per disfare al fare per rifare | Modular design towards the circular economy – From making to unmake to making to remake", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 14, pp. 274-283. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/14232023 [Accessed 23 March 2026].

Porfirione, C., Ferrari Tumay, X. and Leggiero, I. (2024), "Conoscenza, innovazione e cambiamento – Il potere dell'errore nel design e nei sistemi complessi | Knowledge, innovation, and change", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 16, pp. 232-241. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/16202024 [Accessed 23 March 2026].

Raffaeli, R., Lettori, J., Schmidt, J., Peruzzini, M. and Pellicciari, M. (2021), "A systematic approach for evaluating the adoption of additive manufacturing in the product design process", in *Applied Sciences*, vol. 11, issue 3, article 1210, pp. 1-21. [Online] Available at: doi.org/10.3390/app11031210 [Accessed 10 April 2026].

Scala, P. (2023), "Non solo pelle – Modulo oggetto e modulo misura nella composizione dell'involucro architettonico | Not just skin – Object module and measure module in the composition of the architectural envelope", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 14, pp. 96-105. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/1472023 [Accessed 10 April 2026].

Sposito, C. and De Giovanni, G. (2023), "Affrontare la complessità – Integrare LCA, ERA ed ESA per valutare impatti e benefici antropici sulla biosfera | Dealing with complexity – Integrating LCA, ERA and ESA to assess human impacts and benefits on the biosphere", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 14, pp. 12-39. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/1412023 [Accessed 10 April 2026].

Srivastava, M. and Rathee, S. (2022), "Additive manufacturing – Recent trends, applications and future outlooks", in *Progress in Additive Manufacturing*, vol. 7, pp. 261-287. [Online] Available at: doi.org/10.1007/s40964-021-00229-8 [Accessed 23 March 2026].

Su, C., Yuan, M., Fan, Y., Zhu, L. and Hu, N. (2023), "Parametric design and modular construction of a large additive-manufactured hypar shell structure", in *ARIN*, vol. 2, article 21, pp. 1-14. [Online] Available at: doi.org/10.1007/s4422 3-023-00041-0 [Accessed 10 April 2026].

Sully, A. (2024), *Interior design – Conceptual Basis*, Springer, Cham. [Online] Available at: doi.org/10.1007/978-3-031-51410-4 [Accessed 23 March 2026].

Thompson, M. K., Moroni, G., Vaneker, T., Fadel, G., Campbell, R. I., Gibson, I., Bernard, A., Schulz, J., Graf, P., Ahuja, B. and Martina, F. (2016), "Design for additive manufacturing – Trends, opportunities, considerations, and constraints", in *CIRP Annals*, vol. 65, issue 2, pp. 737-760. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.cirp.2016.05.004 [Accessed 23 March 2026].

UN – United Nations (2015), *Transforming our World – The 2030 Agenda for Sustainable Development*, document A/RES/70/1. [Online] Available at: sustainabledevelopment.un.org/index.php?page=viewandtype=111andnr=8496andmenu=35 [Accessed 23 March 2026].

Zimmerman, J., Stolterman, E. and Forlizzi, J. (2010), "An analysis and critique of research through design – Towards a formalization of a research approach", in Halskov, K. and Grave Petersen, M. (eds), *DIS 2010 | Proceedings of the 8th ACM Conference on Designing Interactive Systems, Aarhus, Denmark, August 16-20, 2010*, Association for Computing Machinery, New York, NY, pp. 310-319. [Online] Available at: doi.org/10.1145/1858171.1858228 [Accessed 23 March 2026].

Weninger, J., Arnst, I., Dick, M. and Ascher, M. (2024), "Mechanisms of aesthetics – On the perception of materials and their properties", in *IOP Conference Series | Earth and Environmental Science*, vol. 1320, issue 1, article 012023, pp. 1-12. [Online] Available at: doi.org/10.1088/1755-1315/1320/1/012023 [Accessed 10 April 2026].

Yang, S. and Zhao, Y. F. (2015), "Additive manufacturing-enabled design theory and methodology – A critical review", in *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 80, issue 1-4, pp. 327-342. [Online] Available at: doi.org/10.1007/s00170-015-6994-5 [Accessed 10 April 2026].

Zhang, Y., Song, Y. and Luo, J. (2023), "The effect of sustainable and natural looking on perceived aesthetics and eco-friendliness in building material evaluation", in *Buildings*, vol. 13, issue 2, article 483, pp. 1-12. [Online] Available at: doi.org/10.3390/buildings13020483 [Accessed 10 April 2026].

AGATHÓN – International Journal of Architecture, Art and Design | n. 19 | 2026 | pp. 516-529
ISSN print: 2464-9309 – ISSN online: 2532-683X | doi.org/10.69143/2464-9309/19302026

Article Info

Received 09 March 2026
Revised 15 April 2026
Accepted 17 April 2026
Published 30 June 2026

MONITORAGGIO DELLO STATO UMANO NELLA FORMAZIONE MARITTIMA
Il caso On Watch

HUMAN STATE MONITORING IN MARITIME TRAINING
The On Watch case

Mario Ivan Zignego, Alessandro Bertirotti, Paolo Gemelli, Laura Pagani

Abstract

Nei domini critici per la sicurezza la formazione è un'infrastruttura socio-tecnica (spazi, interfacce, procedure e fasi di prepara-zione e di riesame finale) che sostiene l'apprendimento e la cultura della sicurezza. In questa prospettiva il paper propone il quadro operativo del Designer-in-the-Loop (DITL) per introdurre gli Human State Monitoring Systems (HSMS) nella formazione marittima, rendendo verificabili i compromessi tra innovazione digitale e rischi di sorveglianza, distorsioni e disuguaglianze. In tale quadro, On Watch è assunto come caso di studio poiché consente di sperimentare operativamente il framework in un contesto applicativo concreto, integrando segnali multimodali e traducendoli in indicatori probabilistici non prescrittivi, privi di graduatorie e di automatismi decisionali, a supporto del riesame finale. Una sperimentazione pilota, articolata in tre contesti – ECDIS, plancia cooperativa e colloquio – valuta la fattibilità, l'utilità e l'accettabilità mediante indicatori chia-ve di prestazione tecnico-operativi e socio-distributivi replicabili.

In safety-critical domains, training is a socio-technical infrastructure (spaces, interfaces, procedures, and preparation, execution, and final review phases) that supports learning and the development of a safety culture. From this perspective, the paper proposes an operational framework for Designer-in-the-Loop (DITL) to introduce Human State Monitoring Systems (HSMS) into maritime training, making the trade-offs between digital innovation and surveillance-related risks, such as bias and inequality, explicit and verifiable. Within this framework, On Watch is adopted as a case study, enabling operational testing in a concrete application context by integrating multimodal signals and translating them into non-prescriptive probabilistic indicators, without rankings or automated decision-making, in support of the final review phase. A pilot experiment, structured across three contexts – ECDIS, cooperative bridge, and interview – evaluates feasibility, usefulness, and acceptability through replicable technical-operational and socio-distributive key performance indicators.

Keywords

formazione marittima per la sicurezza, monitoraggio dello stato umano, governance dei dati, tecnologie digitali, monitoraggio multimodale

maritime safety training, human state monitoring, digital technologies, data governance, multimodal monitoring

Mario Ivan Zignego, Full Professor at the Department of Architecture and Design (DAD) at the University of Genoa (Italy), conducts research in nautical design and digital innovation. E-mail: mario.ivan.zignego@unige.it

Alessandro Bertirotti, Adjunct Professor at the Department of Architecture and Design (DAD) at the University of Genoa (Italy), conducts research in anthropology and design. E-mail: alessandro.bertirotti@edu.unige.it

Paolo Gemelli, Adjunct Professor at the Department of Architecture and Design (DAD) at the University of Genoa (Italy), conducts research in naval architecture and training. E-mail: paolo.gemelli@edu.unige.it

Laura Pagani is a PhD Candidate at the Department of Architecture and Design (DAD), University of Genoa (Italy). She conducts research in human-centred artificial intelligence and socio-technical systems for safety training in the maritime domain. E-mail: laura.pagani@edu.unige.it



Nei domini critici per la sicurezza la formazione è un'infrastruttura socio-tecnica: spazi (aule, simulatori, plance), artefatti (checklist, procedure) e fasi – soprattutto per la preparazione e il riesame finale – che abilitano l'apprendimento, la prevenzione degli errori e la costruzione di una cultura della sicurezza. Nel settore marittimo le performance dipendono dalla cooperazione, dalla consapevolezza situazionale e dalla gestione del carico cognitivo; per questo l'infrastruttura formativa è 'abilitante' per la continuità operativa e la riduzione del rischio. In tale scenario la digitalizzazione (sensori, analisi dati, simulazione, AI/IoT) può migliorare qualità e tracciabilità della formazione (SDG 9), ma può anche innescare violazione della privacy, distorsioni e disuguaglianze (SDG 10) se non progettata e governata (Salas et alii, 2012; Aguinis and Kraiger, 2009; ISO, 2019; Fig. 1). Questo rende cruciale progettare strumenti che sostengano la riflessione, non il mero adeguamento passivo.

In tale ottica il contributo assume che il nodo non è se adottare tecnologie basate sui dati nella formazione sui domini critici per la sicurezza, ma come progettarle affinché l'innovazione resti coerente con i principi dell'Industria 5.0 e con un paradigma centrato sull'uomo: la tecnologia deve aumentare la capacità del sistema di apprendere dall'esperienza e prevenire l'errore, senza trasformare l'infrastruttura formativa in un apparato di controllo. Ne deriva che il valore degli Human State Monitoring Systems (HSMS) non dipende solo dall'accuratezza dell'inferenza, ma anche dalla capacità dell'infrastruttura di rendere espliciti gli scopi, i limiti e le responsabilità lungo l'intero ciclo d'uso. A tal fine il progetto deve incorporare vincoli tecnici e organizzativi che impediscano riusi incompatibili e letture prescrittive.

L'ipotesi di fondo è che tale equilibrio sia raggiungibile solo spostando il focus dalla conformità ex post (norme e politiche aggiunte 'a posteriori') al governo del sistema integrato fin dalla progettazione: minimizzazione e separazione dei dati identificativi, consenso informato e revocabile, facoltà del soggetto di sottrarsi al monitoraggio, politiche di conservazione, tracciabilità e verifica, limiti d'uso espliciti e verificabili lungo l'intero ciclo vita del sistema. In altre parole la governance non è un capitolo 'normativo' a margine, ma una componente progettuale che condiziona interfacce, flussi informativi e fasi operative entro cui la tecnologia prende significato (Mittelstadt, 2019; NIST, 2023; OECD, 2019).

All'interno di questo quadro si collocano il caso studio On Watch e il prototipo Human State Monitoring System (HSMS), sviluppato e testato in contesti didattici e simulativi progressivi (aula con simulatore ECDIS – Electronic Chart Display and Information System, simulazione di plancia con ruoli cooperativi, colloqui / selezione), in collaborazione con l'Università di Genova e la FAIMM Accademia della Marina Mercantile, nell'ambito del programma 'ITS 4.0' (MIM, 2025). HSMS integra segnali multimodali (voce, indizi facciali e posturali, respirazione, testo e interazioni operative) e li traduce in indicatori probabilistici di stato (ad esempio attivazione e carico) da utilizzare come supporto informativo nelle fasi di preparazione e di riesame finale. In coerenza con l'obiettivo di evitare derive disciplinari e disuguaglianze il sistema è deliberatamente non prescrittivo: non produce classifiche individuali, non abilita graduatorie, non automatizza decisioni operative e non è progettato per finalità di controllo del lavoratore, ma restituisce visualizzazioni e segnali configurabili per scenario e fase, con tracciabilità delle fonti e controllo umano (Ronca et alii, 2023; Liu et alii, 2020; Figg. 2, 3).

L'originalità del contributo è duplice. In primo luogo propone una lettura della 'sicurezza formativa' come infrastruttura progettuale e gestionale, dove spazi, interfacce e fasi costituiscono un'unità inscindibile: è in tale unità che si producono o si riducono errori, sovraccarico informativo, false sicurezze e fallimenti di coordinamento. In secondo luogo formalizza un quadro operativo Designer-in-the-Loop per rendere misurabile e verificabile il compromesso tra innovazione digitale e riduzione delle disuguaglianze: l'adozione degli HSMS viene governata ex ante (attraverso la valutazione dei rischi di uso improprio, delle distorsioni e delle barriere d'accesso) ed ex post (tramite KPI tecnico-operativi e socio-distributivi) così che i compromessi non restino impliciti, ma diventino oggetto di progetto, verifica e miglioramento iterativo.

Alla luce di queste premesse il contributo si propone di chiarire come l'impiego di HSMS nella formazione marittima possa aumentare la qualità del riesame finale e dell'apprendimento dall'errore senza produrre effetti regressivi di sorveglianza o disuguaglianza. In particolare il paper: a) inquadra criticamente il dibattito su Affective Computing e HSMS nei domini critici per la sicurezza, evidenziando limiti epistemici e rischi d'uso improprio; b) descrive On Watch come caso di studio, mettendo in primo piano l'architettura dell'esperienza, le scelte di interfaccia e gli scenari d'uso; c) formalizza il quadro metodologico Designer-in-the-Loop con requisiti e KPI tecnico-operativi e socio-distributivi per una valutazione ex ante ed ex post replicabile e trasferibile. Il paper è organizzato come segue: stato dell'arte; caso studio; architettura dell'esperienza; interazione e interfacce; framework Designer-in-the-Loop; protocollo e KPI; risultati preliminari e discussione; barriere/limiti e trasferibilità; SDG; conclusioni.

Le domande di ricerca sono: 1) quali condizioni progettuali e di governance consentono di integrare HSMS nella formazione dei domini critici per la sicurezza senza trasformarli in dispositivi prescrittivi o disciplinari; 2) quali scelte di architettura dell'esperienza e di interfaccia rendono il sistema verificabile, controllabile e non prescrittivo nei diversi scenari; 3) quale set minimo di requisiti, soglie di qualità e KPI permette una valutazione replicabile e supporta la trasferibilità verso altri domini critici per la sicurezza.

Per rispondere a tali domande il paper combina una rassegna critica della letteratura internazionale con l'analisi del caso On Watch e la descrizione operativa del protocollo sperimentale, esplicitando requisiti, vincoli e indicatori necessari a replicare lo studio in altri contesti.

Stato dell'arte | L'adozione dell'Affective Computing e degli Human State Monitoring Systems nella formazione in contesti critici per la sicurezza incrocia tre filoni: inferenza multimodale di stati affettivi / cognitivi; formazione e valutazione delle prestazioni in ambienti ad alta criticità; studi su monitoraggio e sorveglianza, equità e governance dei dati. La rassegna è intenzionalmente critica: l'obiettivo non è legittimare attribuzioni di punteggio automatico, ma chiarire limiti epistemici, rischi d'uso improprio e requisiti progettuali per rendere tali sistemi verificabili e trasferibili (Picard, 1997; Poria et alii, 2017; D'Mello and Kory, 2015; Ajunwa, Crawford and Schultz, 2017; Eurofound, 2020; Zuboff, 2019). In questa prospettiva la multimodalità e la natura situata dei processi percettivi / decisionali suggeriscono di trattare i risultati come stime probabilistiche e contestuali, a supporto della costruzione condivisa di senso nelle fasi di preparazione e di riesame finale e non come verdetti prescrittivi (Gazzaniga, 2005).

La letteratura sul rilevamento delle emozioni conferma la spinta verso approcci multimodali, ma evidenzia eterogeneità di protocolli, comparabilità limitata, disallineamenti tra insiemi di dati e problemi di generalizzazione, imponendo cautela contro false precisioni in domini critici per la sicurezza (Zeng et alii, 2009; Koelstra et alii, 2012). Nel filone dei fattori umani l'utilità degli HSMS emerge soprattutto quando sono integrati nella funzione pedagogica di preparazione e di riesame finale, in cui la qualità della riflessione dipende da artefatti, ruoli e sequenze comunicative più che dalla sola disponibilità di dati (Hart and Staveland, 1988; Endsley, 1995; Hancock and Matthews, 2019).

Sul piano applicativo alcune buone pratiche internazionali nell'ambito dell'addestramento basato su simulatori mostrano come l'uso di indicatori di carico e di stress sia più robusto quando è ancorato a scenari, a marker e a un riesame finale strutturato, e quando le misure sono trattate come evidenze contestuali e non come punteggi individuali. Studi recenti nella simulazione su ponti evidenziano il valore della triangolazione tra dati psicofisiologici e osservazioni operative per interpretare carico di lavoro, stress e attenzione e per discutere criticamente limiti e affidabilità delle misure (Wulvik, Dybvik and Steinert, 2020; Ronca et alii, 2023; Xue et alii, 2024). Questi casi indicano criteri di selezione trasferibili: a) scenario ad alta criticità con ruoli espliciti; b) raccolta multimodale con punti di verifica della qualità; c) restituzione non prescrittiva nel riesame finale; d) governance che limita riusi disciplinari.

Infine nel dibattito su oggetti e servizi 'potenziati dall'intelligenza artificiale' l'attenzione si sposta verso l'esperienza d'uso e le responsabilità progettuali: configurabilità, controllo umano effettivo e integrazione della filiera dei dati diventano condizioni per evitare effetti regressivi e rendere i sistemi verificabili (Arquilla and Paracolli, 2023; Osello et alii, 2024; Villani, Romagna and Oddi, 2024), mentre studi su design dell'errore, alienazione e pressione valutativa mettono in guardia dal rischio di trasformare strumenti formativi in dispositivi di controllo; contributi sull'inclusività della multimodalità suggeriscono inoltre di leggere i segnali come evidenze situate da discutere nel riesame finale piuttosto che come mere etichette (Porfirione, Ferrari Tumay and Leggiero, 2024; Vacanti et alii, 2025; Rosmino, 2024; Arquilla and Caruso, 2025; Zehr Gantz et alii, 2025). Ne deriva il requisito di prevenire impieghi ai fini di sorveglianza lungo l'intera filiera, tramite il governo di un sistema integrato fin dalla progettazione e valutazioni anche socio-distributive; l'AI Act rafforza questa impostazione in termini di rischio, trasparenza e responsabilità organizzativa (European Union, 2024).

Caso studio: On Watch e HSMS | Il contributo si fonda sul caso studio On Watch e sul prototipo

HSMS, concepito come piattaforma sperimentale per supportare la formazione e il riesame finale in contesti critici per la sicurezza. La sperimentazione pilota è stata sviluppata con la FAIMM Accademia della Marina Mercantile e l'Università di Genova nell'ambito dell'ITS 4.0 Challenge 2025 (MIM, 2025). La sperimentazione segue una strategia a complessità crescente in tre contesti: a) aula con simulatore ECDIS; b) plancia cooperativa con ruoli differenziati; c) colloquio / selezione, con configurazioni più restrittive per ridurre lo stigma e il rischio d'uso improprio. Nello scenario plancia la prova principale usa un'emergenza 'uomo in mare' con più ruoli (Fig. 4); il simulatore 'integrale di plancia' impiegato per lo scenario cooperativo è illustrato in Figura 5.

All'interno di On Watch il prototipo HSMS integra segnali multimodali (voce, indizi facciali e posturali, parametri respiratori, testo e interazioni) e li traduce in indicatori probabilistici (ad esempio attivazione e carico) a supporto delle fasi di preparazione e di riesame finale. Il sistema è deliberatamente non prescrittivo: non produce una graduatoria né automatizza le decisioni, ma restituisce visualizzazioni configurabili con incertezza e tracciabilità (Ronca et alii, 2023; Wulvik, Dybvik and Steinert, 2020; Xue et alii, 2024). L'uso di segnali sensibili richiede minimizzazione, pseudonimizzazione, accesso controllato, tempi definiti di conservazione dei dati e procedure di verifica, con un'informativa chiara e un consenso revocabile, nonché la facoltà di non aderire al monitoraggio; tali vincoli sono incorporati nelle fasi di preparazione e di riesame finale e nell'interfaccia utente, secondo una logica integrata di governo del sistema fin dalla progettazione.

Architettura dell'esperienza formativa | Nei contesti critici per la sicurezza l'efficacia della formazione dipende meno dalla singola esercitazione e più dall'architettura dell'esperienza che la incornicia: preparazione, esecuzione, riflessione guidata. Nel caso On Watch tale architettura è stata progettata come una sequenza intenzionale di preparazione, scenario e riesame finale, in cui il monitoraggio multimodale non è sovrapposto all'attività, ma collocato in punti specifici del flusso per massimizzare l'utilità formativa e minimizzare gli effetti regressivi (Fanning and Gaba, 2007; Rudolph et alii, 2006; Cheng et alii, 2014). In questa prospettiva la percezione-azione e la riflessione post-evento capitalizzano il modo in cui il cervello 'riempie' le lacune e ricostruisce scenari dinamici, per esempio la soppressione saccadica e l'integrazione con la memoria e le aspettative. Di qui la scelta di concentrare gli HSMS sul riesame finale, fase in cui segnali eterogenei possono essere 'riancorati' temporalmente a eventi e decisioni operative, riducendo la 'falsa precisione' della lettura in tempo reale e valorizzando il controllo umano.

Nella fase di preparazione il formatore allinea gli obiettivi didattici e lo scenario, chiarisce ruoli e responsabilità (in particolare nei contesti cooperativi) ed esplicita le condizioni di uso del dato come parte del governo del sistema integrato fin dalla progettazione: finalità formative e di ricerca, esclusione di scopi disciplinari, minimizzazione, pseudonimizzazione, accesso controllato, possibilità di revoca e facoltà di non aderire al monitoraggio, tempi di conservazione dei dati e tracciabilità. La preparazione assume anche una funzione di 'contratto psicologico' per ridurre i timori di sorveglianza e orientare l'interpretazione degli esiti restituiti dal sistema, come supporto al riesame finale.

Nel corso dello scenario l'obiettivo non è 'misurare l'emozione' come etichetta, ma osservare come gli stati emotivi e cognitivi emergano e varino in condizioni di pressione operativa e di cooperazione. La raccolta dati è impostata come filiera sincronizzata, finalizzata all'analisi successiva alla sessione: comportamento operativo e interazioni, segnali facciali e posturali, parametri vocali e prosodici, contenuti verbali e dinamiche comunicative. In coerenza con l'obiettivo di evitare interferenze operative, gli HSMS possono produrre segnali di attenzione calibrabili per fase e scenario, progettati per ridurre falsi allarmi e non dirottare il comportamento dell'operatore.

Il riesame finale è la fase in cui l'infrastruttura diventa effettivamente 'empatica': si costruisce una lettura situata dell'esperienza e si mettono in relazione decisioni, comunicazioni e momenti critici. Gli HSMS entrano pienamente in questa fase perché consentono di ancorare la discussione a evidenze temporali e multimodali, senza trasformarle in punteggi individuali. In chiave di prevenzione di derive verso logiche di sorveglianza, il riesame finale è anche un presidio di governance poiché definisce cosa può essere discusso, chi può accedere alle visualizzazioni, quali dati sono pertinenti allo scopo didattico e come vengono conservati o eliminati.

Interazione e interfacce | Nel caso On Watch l'interazione è progettata con un assunto esplicito: in un dominio critico per la sicurezza, l'interfaccia utente non deve 'chiudere' l'interpretazione, ma abilitare una lettura verificabile dei dati durante la preparazione e il riesame finale. In linea con questo principio le interfacce degli HSMS sono con-

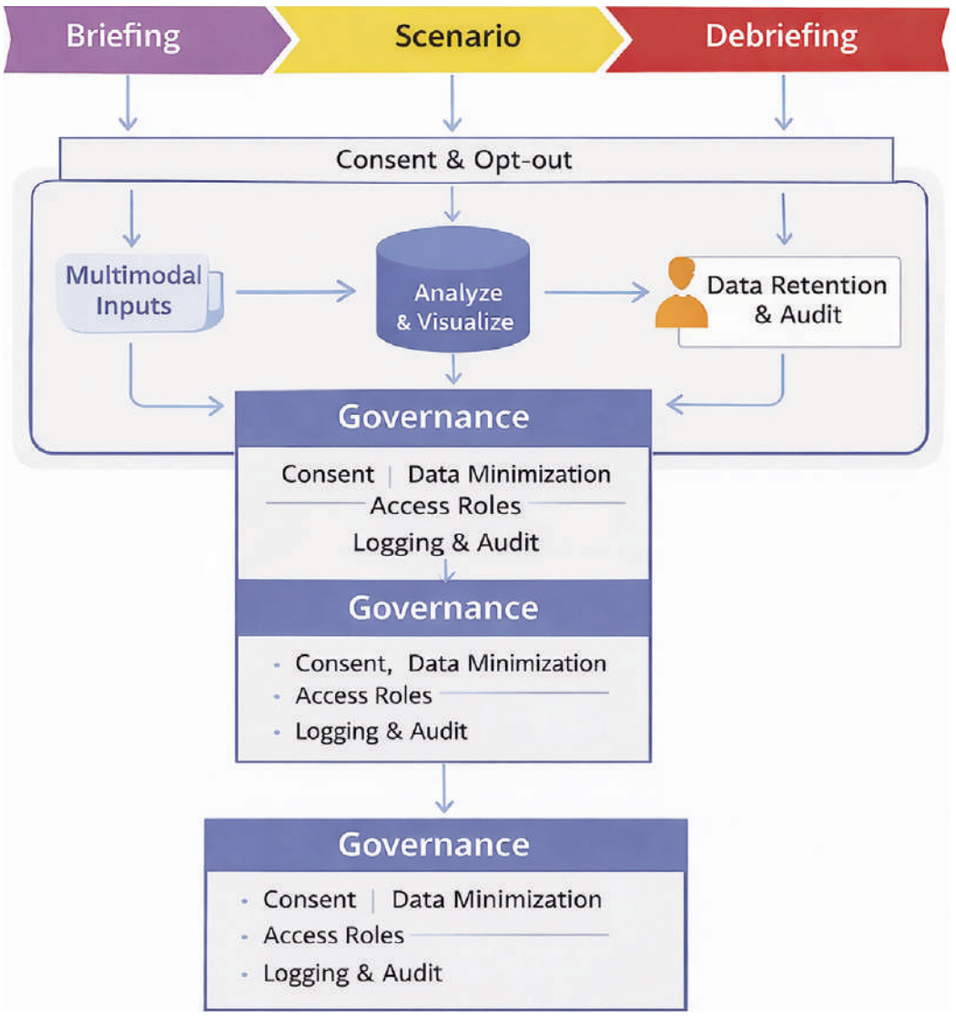


Fig. 1 | Architecture of the training experience – briefing, scenario, debriefing – and HSMS and governance intervention points – consent / opt-out, minimisation, retention, and audit (credit: the Authors; AI-generated with ChatGPT, 2026).

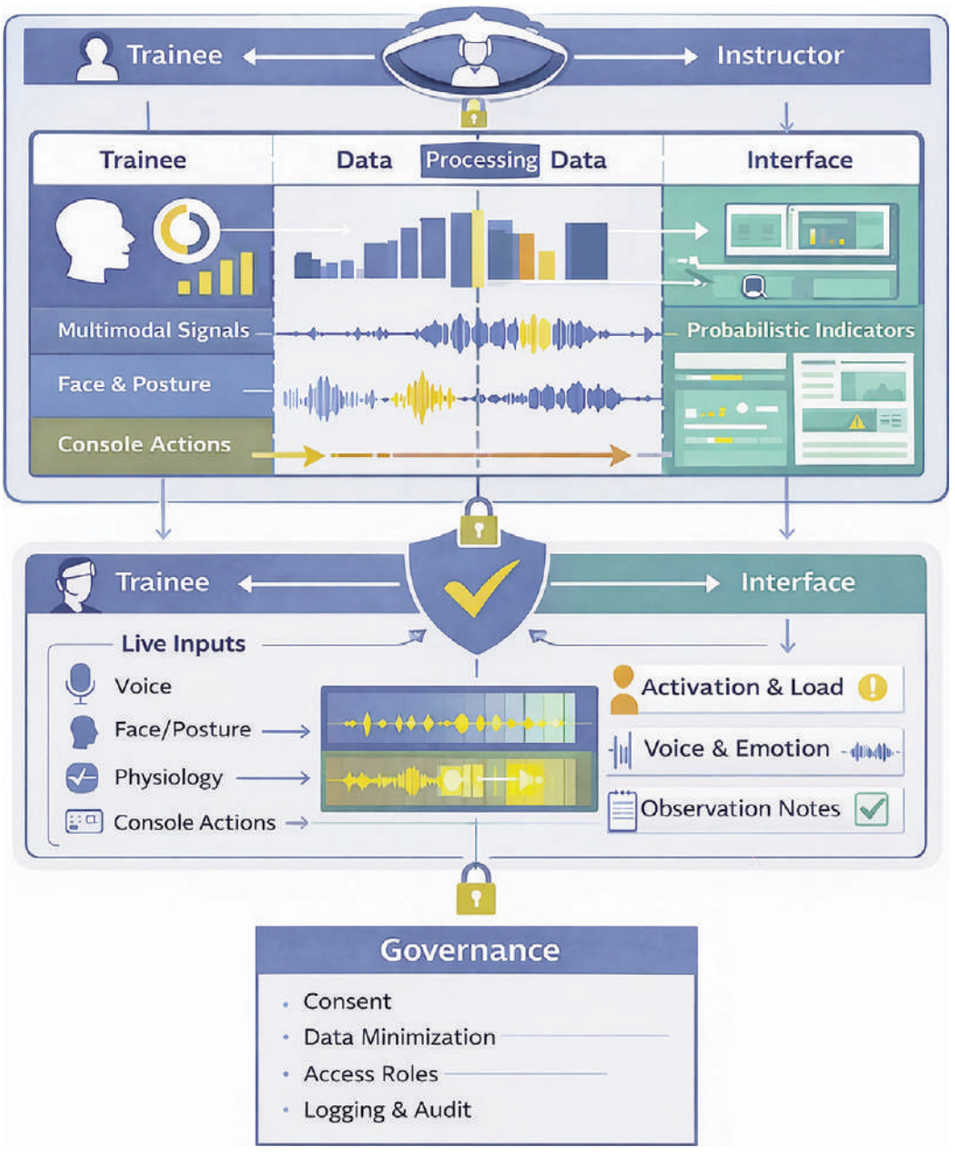


Fig. 2 | HSMS socio-technical ecosystem: actors (trainee / instructor), multimodal data flow, processing, and levels of interface output with governance-by-design constraints (credit: the Authors; AI-generated with ChatGPT, 2026).

cepite come strumenti di interpretazione orientati a rendere visibili gli andamenti e le discontinuità temporali, collegarli a eventi operativi e comunicativi, esplicitare l'incertezza e la provenienza dell'inferenza e preservare il controllo umano effettivo, prevenendo derive prescrittive o disciplinari (Parasuraman and Riley, 1997).

Il prototipo HSMS adotta un set limitato di viste, pensate per il riesame finale (e solo marginalmente per la fase in tempo reale), evitando KPI sintetici unidimensionali che tendono a trasformarsi in valutazione. La progettazione dell'interfaccia utente può sfruttare principi gestaltici (prossimità, somiglianza, buona continuità e chiusura) per raggruppare eventi, marcatori e indicatori lungo la linea temporale, riducendo il carico cognitivo e favorendo il riconoscimento di configurazioni senza tradursi in attribuzioni di punteggi. Ad esempio il raggruppamento per ruolo e fase (somiglianza), l'allineamento del marcatore con traiettorie visive continue (buona continuità) e la chiusura delle lacune informative con le note del formatore (chiusura) supportano la discussione senza scivolare in graduatorie. La vista di default è una linea temporale con indicatori probabilistici (ad esempio attivazione e carico) e marcatori di scenario; una vista degli eventi consente, selezionando un intervallo, di visualizzare azioni operative, comunicazioni e cambi di ruolo, con la possibilità di annotazioni del formatore. Una vista multimodale basata sulle evidenze rende accessibili, quando necessario e autorizzato, le fonti che hanno contribuito alla stima (caratteristiche vocali e prosodiche e indizi facciali e posturali aggregati), corredate da marcatura temporale e metadati di qualità. Nei contesti cooperativi l'interfaccia utente supporta una lettura per ruolo, evitando confronti competitivi (Fig. 6).

Un requisito chiave è la configurabilità per scenario e fase: scenario ECDIS (con enfasi su carico e decisioni), plancia cooperativa (con enfasi su coordinazione e comunicazioni) e colloquio e selezione (con configurazioni più restrittive per ridurre il rischio di stigmatizzazione). La configurazione influisce sulla granularità temporale, sulla visibilità delle fonti e sulle regole di accesso, cioè su chi può vedere cosa e quando. Tale impostazione costituisce una misura di governo del sistema integrato fin dalla progettazione: l'interfaccia utente incorpora limiti d'uso e vincoli di accesso come parte integrante dell'esperienza, rendendo più difficile la perdita di funzionalità (Fig. 7); l'ambiente ECDIS utilizzato nel pilot è mostrato nella Figura 8.

Per garantire una responsabilità tracciabile il prototipo HSMS rende verificabili la provenienza e la qualità delle modalità, le trasformazioni (dal segnale alla caratteristica estratta fino all'indicatore) e le registrazioni degli accessi, sottoposte a verifica. La non-prescrittività deriva dall'assenza di graduatorie, dalla visibilità dell'incertezza e dal controllo della visibilità delle fonti.

Framework Designer-in-the-Loop | Il framework Designer-in-the-Loop (DITL) proposto in questo contributo nasce da una premessa tipica della 'design research' applicata ai sistemi complessi: quando una tecnologia entra in un contesto sensibile alla sicurezza non 'si aggiunge' semplicemente a un processo esistente: ridefinisce invece l'infrastruttura socio-tecnica che sostiene l'apprendimento. Nel caso di un HSMS ciò significa intervenire contemporaneamente su rituali (preparazione / riesame finale), artefatti (dashboard, log, report), aspettative (cosa è legittimo dedurre dai dati) e relazioni di potere (chi osserva, chi è osservato, chi decide, chi può contestare). Per questo il divario tra innovazione (SDG 9) e riduzione delle disuguaglianze (SDG 10) non può essere trattato come un'appendice normativa: deve diventare un requisito progettuale, osservabile e verificabile nella pratica.

Nella fase ex-ante, prima di attivare qualsiasi raccolta dati, l'adozione viene impostata come un esercizio di 'definizione progettuale dei vincoli': si chiariscono scopo e limiti (formazione e riesame finale, non disciplina), si mappa la filiera informativa e si traducono rischi in requisiti di esperienza e interfaccia: configurabilità per scenario e fase, assenza di assegnazione di punteggi valutativi, indicatori probabilistici con incertezza visibile, tracciabilità delle fonti e controllo umano effettivo, oltre all'integrazione delle regole già in fase di progettazione (Fig. 9).

Nella fase ex-post il DITL chiede di misurare l'impatto in modo bifocale: da un lato si valutano esiti tecnico-operativi coerenti con l'SDG 9 tra cui la qualità del debriefing rispetto alla ricostruzione degli eventi, all'individuazione di fasi critiche e alla lezione appresa, all'utilità per il formatore e alla stabilità e affidabilità delle stime in condizioni realistiche, dall'altro lato si valutano esiti socio-distributivi coerenti con l'SDG 10: accettabilità e fiducia, per-

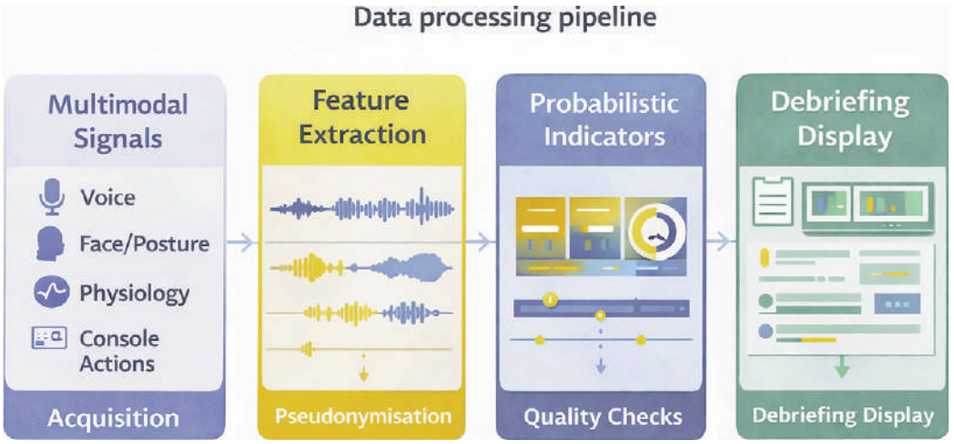


Fig. 3 | Data processing pipeline: multimodal acquisition, feature extraction, generation of probabilistic indicators, quality checks, and visualisation for debriefing, with pseudonymisation (credit: the Authors; AI-generated with ChatGPT, 2026).

cezione di sorveglianza o pressione valutativa e possibili disparità negli esiti tra gruppi a parità di scenario. Quando emergono criticità è importante il ritorno alla fase progettuale attraverso modifiche all'interfaccia utente, indicatori e sequenza preparazione / riesame finale e rafforzamento dei vincoli di accesso. In questo modo i compromessi con gli SDG 9 e 10 diventano oggetto di iterazione progettuale e di verifica.

Protocollo di validazione e replicabilità | Il protocollo mira a rendere replicabile la sperimentazione, valutando l'effetto dell'infrastruttura sull'apprendimento e sulla prevenzione di derive prescrittive o inique. Campione e sessioni (pilot esplorativo): tre partecipanti per scenario, tre sessioni registrate, durata media 6 minuti; obiettivo: fattibilità, integrazione nel riesame finale e accettabilità, non generalizzazione statistica. Il protocollo adotta una strategia a complessità crescente, articolata in tre contesti (aula / ECDIS, plancia cooperativa, colloquio), ciascuno strutturato in preparazione standardizzata, esecuzione dello scenario e riesame finale guidato con HSMS. Per soddisfare il requisito di replicabilità la Tabella 1 sintetizza, per ciascuna fase, i dati in ingresso, gli esiti attesi, i vincoli, i KPI, le soglie di qualità e le condizioni di validità del protocollo.

La validazione coinvolge allievi / partecipanti dei percorsi formativi FAIMM e, nello scenario plancia, team con ruoli distinti. I criteri di selezione e inclusione sono documentati; dove rilevante, vengono registrate le variabili contestuali (esperienza, lingua / accenti, condizioni che possano influire sulla voce o sulla mimica) per valutare l'affidabilità dei risultati e monitorare eventuali disparità. Per ogni sessione vengono acquisiti dati coerenti con la minimizzazione e lo scopo formativo: audio e video, dove previsti, parametri fisiologici non invasivi, oltre a registri di interazione ed eventi di scenario. La filiera è documentata in acquisizione / sincronizzazione, estrazione delle caratteristiche rappresentative e generazione di indicatori probabilistici con metadati di qualità. Il protocollo specifica i punti in cui si applicano la pseudonimizzazione, il controllo degli accessi e la tracciatura delle operazioni.

Per rendere riproducibile la valutazione, la filiera include un controllo qualità che segnala come 'non affidabili' i segmenti con qualità del segnale scarsa, escludendoli dalle sintesi e rendendoli visibili lungo la linea temporale come intervalli a bassa confidenza. I KPI sono definiti come set minimo: KPI tecnici = quota di segmenti affidabili / non affidabili, stabilità intra-sessione, coerenza temporale con marcatore di scenario; KPI formativi = numero di momenti critici discussi e lezioni apprese emerse nel riesame finale, qualità della ricostruzione (ancoraggio a eventi / indicatori); KPI socio-distributivi = accettabilità (fiducia, percezione di sorveglianza / pressione), chiarezza dei limiti d'uso e verifica di possibili differenze sistematiche tra gruppi a parità di scenario.

La valutazione segue il set di KPI sopra definito; il pacchetto di replicazione include: schede scenario, testi della fase di preparazione, schema del riesame finale, configurazioni HSMS per scenario, definizioni degli KPI tecnici e socio-distributivi e procedure di governance (Fig. 10).

Risultati preliminari e discussione critica | I risultati preliminari sono coerenti con la natura sperimentale del caso On Watch: l'obiettivo non è dimostrare un'accuratezza assoluta dell'inferenza, bensì verificare se l'infrastruttura proposta riesca a generare valore formativo senza innescare effetti regressivi. Sul piano tecnico-operativo, le sessioni confermano che la qualità dei segnali non è uniforme e dipende da condizioni pratiche quali rumore, occlusioni, distanza, illuminazione o simultaneità di conversazioni. Ne consegue la necessità di gestire segmenti non affidabili e di trattare i risultati come indicatori probabilistici, associandoli a metadati di qualità, riducendo così la falsa precisione e gli automatismi interpretativi. L'ancoraggio temporale degli indicatori facilita la ricostruzione dei passaggi chiave e rende discutibile la relazione tra gli andamenti (attivazione / carico) e gli eventi operativi. L'effetto osservato è coerente con il ruolo della memoria e della plasticità sinaptica: la ricostruzione guidata, ancorata a marcatori temporali, facilita il potenziamento di tracce pertinenti e la ristrutturazione di schemi operativi, rispetto a ricostruzioni vaghe o puramente verbali.

Sul piano formativo l'evidenza più consistente riguarda la qualità della fase di riesame finale: l'uso del prototipo HSMS come supporto ha consentito di strutturare la discussione su momenti critici identificabili, riducendo ricostruzioni vaghe e favorendo le lezioni apprese. Nei contesti cooperativi, la lettura per ruolo e per fase supporta la discussione sulla coordinazione, senza produrre giudizi individuali; la presenza di evidenze temporali facilita una narrativa sull'errore come risorsa, più che come colpa.

Dal punto di vista socio-distributivo l'accettabilità dipende dalla cornice interpretativa nella fase della preparazione e dalle proprietà dell'interfaccia: quando sono esplicitati scopo e limiti e quando le visualizzazioni restano non prescrittive, la percezione di sorveglianza si riduce. In contesti percepiti come valutativi aumenta la sensibilità allo stigma e all'uso improprio, confermando la necessità di configurazioni più restrittive e di un governo del sistema fin dalla fase di progettazione. Un rischio da monitorare riguarda possibili effetti iniqui 'silenziosi': differenze nei segnali vocali e negli stili comunicativi possono produrre falsi alert differenziali; il contesto DITL impone di trattare tali evidenze come criteri di redesign (riduzione della salienza in condizioni di bassa qualità e rafforzamento della triangolazione).

Limiti, barriere e criticità | L'introduzione di HSMS nella formazione nei domini critici per la sicurezza incontra barriere che non sono solo tecniche, ma soprattutto socio-organizzative. Il contributo adotta intenzionalmente un punto di vista 'orientato al design': l'attenzione è posta sull'architettura dell'esperienza, sulle scelte di interfaccia e sul governo del sistema fin dalla fase di progettazione, più che sulla competizione tra modelli di inferenza. Ne consegue un limite: i risultati non vanno letti come una validazione definitiva dell'accuratezza o della capacità diagnostica. Inoltre la generalizzabilità dei risultati dipende dal contesto di impiego (simulazione o contesti controllati), dall'assetto di acquisizione e dalla cultura organizzativa in cui il sistema viene introdotto.

La barriera più critica è culturale: in molte organizzazioni la formazione si muove su un crinale tra apprendimento e valutazione; il monitoraggio può essere percepito come sorveglianza, soprattutto in assenza di una cultura dell'errore come risorsa. Il rischio di derive legate all'ipersorveglianza rende indispensabile esplicitare scopo e limiti, incorporando vincoli (Eurofound, 2020; Ajunwa, Crawford and Schultz, 2017). Una seconda barriera riguarda la dimensione distributiva: differenze culturali e linguistiche, accenti e stili comunicativi, neurodiversità o condizioni individuali possono alterare la qualità del segnale e l'interpretabilità dei risultati, con il rischio di stigma e disparità. Per questo l'equità e l'accessibilità cognitiva della interfaccia utente devono essere integrate nella fase progettuale e monitorate tramite KPI socio-distributivi (Buolamwini and Gebru, 2018; Raji and Buolamwini, 2019).

Sul piano economico-operativo la diffusione richiede infrastrutture, manutenzione e competenze interdisciplinari; un'adozione parziale, in particolare senza governance e senza formazione dei formatori, può aumentare i rischi. Esistono inoltre barriere normative e di responsabilità relative alla gestione dei dati sensibili, alla chiarezza sull'accesso e sulla conservazione e alla definizione delle responsabilità d'uso. La trasferibilità è plausibile a condizioni minime: riesame finale strutturato, governance integrata nel progetto e interfacce non prescrittive ove siano chiaramente indicate l'incertezza e la tracciabilità dei dati (European Union, 2016, 2024).

SDG: benefici, sinergie e compromessi | Il caso On Watch consente di leggere in termini operativi il profilo di benefici, sinergie e compromessi connesso all'introduzione di HSMS non prescrittivi nella formazione marittima. Sul piano dei benefici diretti il contributo si colloca anzitutto nell'orizzonte dell'SDG 9, poiché propone una forma di innovazione infrastrutturale della formazione fondata su strumenti capaci di supportare in modo verificabile le fasi di preparazione e di riesame finale, senza tradursi in automatismi decisionali o in dispositivi valutativi.

In relazione all'SDG 10 il valore del framework risiede nella riduzione dei rischi distributivi attraverso un'impostazione di governance integrata fin dalla progettazione, che delimita chiaramente gli scopi del sistema, esclude l'attribuzione di punteggi valutativi, rende visibili l'incertezza e la tracciabilità delle inferenze, regola l'accesso ai dati e introduce audit e indicatori socio-distributivi per monitorare possibili effetti iniqui. A ciò si aggiunge un contributo rilevante all'SDG 4, nella misura in cui il sistema migliora la qualità didattica del riesame finale e rafforza l'apprendimento dall'errore, e all'SDG 8, poiché tutela il lavoro dignitoso limitando le pressioni valutative e gli usi disciplinari dei dati e preservando l'autonomia, la dignità e condizioni eque nei processi di formazione e valutazione.

Accanto a questi effetti diretti emergono ricadute indirette che riguardano ulteriori obiettivi di sviluppo sostenibile. In particolare il framework può contribuire all'SDG 3, sostenendo il benessere degli operatori e la prevenzione del sovraccarico; agli SDG 12 e 13 attraverso una logica di sobrietà del dato fondata su minimizzazione, contenimento dei tempi di conservazione e riduzione degli sprechi digitali; all'SDG 16 mediante il rafforzamento di accountability e trasparenza organizzativa; all'SDG 17 grazie alla costruzione di partnership tra università, accademia e stakeholder del settore.

Tali benefici non eliminano tuttavia la presenza di compromessi e rischi residui, che possono incidere anche su altri SDG, in particolare quando persistano accessi diseguali alle infrastrutture, distorsioni nei segnali multimodali o costi computazionali non trascurabili. In questo senso le possibili criticità che possono riverberarsi sugli SDG 1, 2, 5, 7, 11, 14 e 15 non vanno considerate come effetti esterni o secondari, ma come condizioni da governare progettualmente. Proprio qui il framework Designer-in-the-Loop mostra la propria rilevanza, poiché rende tali compromessi osservabili, misurabili e governabili sia ex ante sia ex post, attraverso soglie di qualità, audit, verifiche iterative e aggiustamenti progettuali continui (Fig. 11). Nel loro insieme i risultati mostrano dunque una chiara convergenza con gli SDG 3, 4, 8, 12 e 16, ma anche la necessità di presidiare con attenzione le tensioni legate a sorveglianza, pressione valutativa, pregiudizio e disparità, affinché l'innovazione digitale resti coerente con un paradigma formativo centrato sulla persona.

Conclusioni | Questo contributo propone di spostare il baricentro del dibattito su AI e formazione nei domini critici della sicurezza: non è da chiedersi



Fig. 4 | Storyboard of the 'man overboard' scenario: briefing, alarm, role coordination, and debriefing as the structure of the training experience (credit: the Authors; AI-generated with ChatGPT, 2026).

'quanto è accurato il riconoscimento dello stato umano', ma 'quale infrastruttura socio-tecnica rende l'innovazione verificabile, utile e giusta'. L'analisi del caso On Watch mostra che l'introduzione di un Human State Monitoring System in contesti formativi ad alta criticità produce valore soprattutto quando è progettata come architettura dell'esperienza – preparazione, scenario e riesame finale – e quando le interfacce sono concepite come strumenti di costruzione del significato, anziché come dispositivi di valutazione.

L'aspetto più rilevante emerso dallo studio è che la sostenibilità dell'innovazione non si gioca nella sola performance del modello, bensì nella capacità del progetto di evitare la deriva verso la sorveglianza e le disuguaglianze. Per tale motivo il governo del sistema fin dalla fase di progettazione, che garantisce assenza di ranking, chiara e limitata definizione degli scopi, accesso ai dati, incertezza visibile e tracciabilità delle fonti, è un requisito progettuale intrinseco.

In questo contesto l'innovazione infrastrutturale può produrre impatti positivi solo se accompagnata da vincoli che proteggano la dignità ed l'equità. La sua sostenibilità richiede il passaggio da un 'io progettuale' a un 'noi progettuale': il prototipo HSMS è, in tal senso, un artefatto che prende significato entro pratiche sociali (preparazione e riesame finale) e regimi di governance negoziati con formatori e discenti; solo un'esecuzione co-progettata può conciliare l'utilità (SDG 9) e l'equità (SDG 10).

La trasferibilità dell'approccio non è legata a una specifica manovra o a un simulatore, ma a tre elementi replicabili: la progettazione dell'esperienza formativa come infrastruttura socio-tecnica centrata sulla preparazione e sul riesame finale; un set di scelte di 'interaction design' che mantengano l'interpretazione aperta e verificabile; il framework Designer-in-the-Loop come metodo ex-ante ed ex-post che integri KPI tecnico-operativi e socio-distributivi. Gli sviluppi futuri riguardano: a) robustezza e gestione delle variazioni nel set di dati; b) consolidamento delle metriche e delle procedure di equità contestuale e delle versioni a bassa inva-



Fig. 5 | Full mission bridge simulator used in the cooperative scenario for analysing coordination dynamics and team cognitive workload (credit: the Authors, 2026).

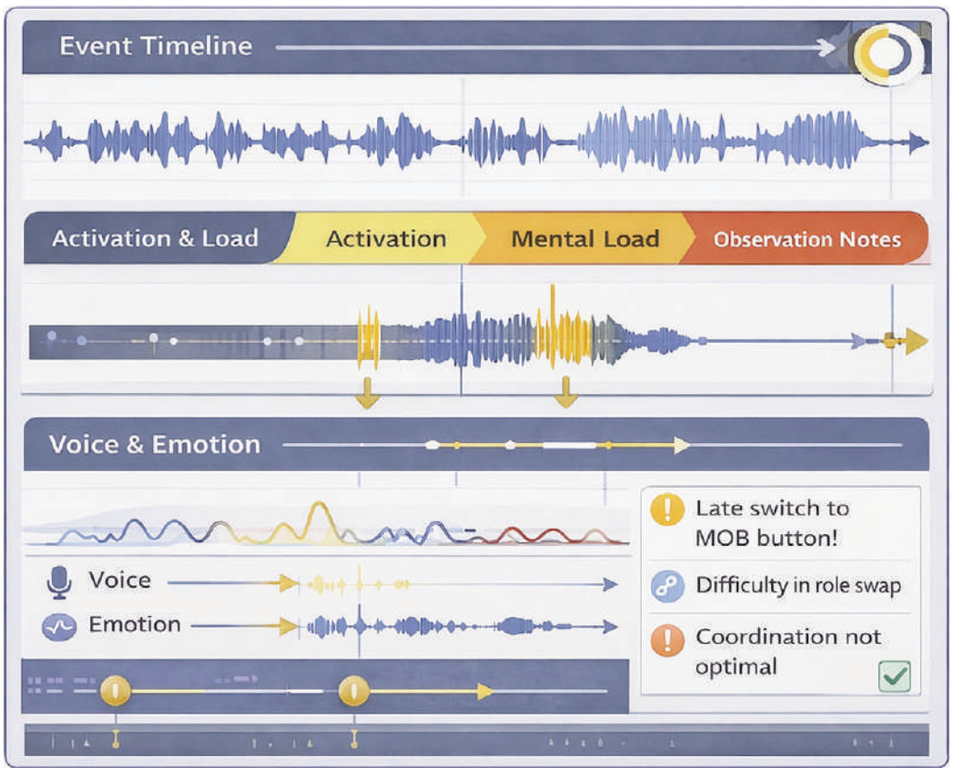


Fig. 6 | Non-prescriptive debriefing interface: event timeline, activation / workload indicators, vocal / emotional signals, and notes panel for guided discussion (credit: the Authors; AI-generated with ChatGPT, 2026).

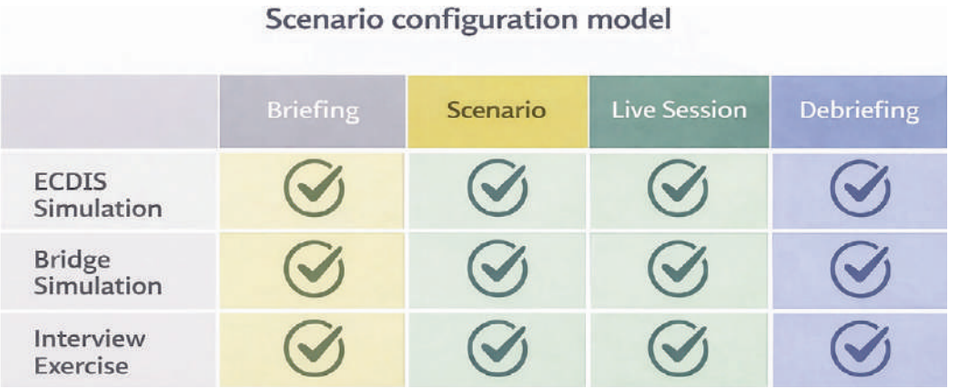


Fig. 7 | Configuration model by scenario and phase: enabling functions across briefing, live, and debriefing in the three settings of ECDIS, bridge, and interview (credit: the Authors; AI-generated with ChatGPT, 2026).

sività; c) formalizzazione delle pratiche di verifica, segnalazione degli incidenti e sospensione dell'uso in caso di criticità. In prospettiva la comunità scientifica è chiamata a valutare gli HSMS nella formazione non solo con metriche predittive, ma con un impianto che consideri esperienza, contesto e governance come variabili costitutive.

In safety-critical domains, training is a socio-technical infrastructure: spaces (classrooms, simulators, bridges), artefacts (checklists, procedures), and phases – especially those related to preparation and final review – that enable learning, error prevention, and the development of a safety culture. In the maritime sector, performance depends on cooperation, situational awareness, and cognitive load management; for this reason, the training infrastructure enables operational continuity and risk reduction. In this context, digitalisation (sensors, data analysis, simulation, AI/IoT) can improve the quality and traceability of training (SDG 9), but it can also trigger privacy violations, biases, and inequalities (SDG 10) if not properly designed and governed (Salas et alii, 2012; Aguinis and Kraiger, 2009; ISO, 2019; Fig. 1). This makes it crucial to design tools that support reflection, rather than mere passive compliance.

From this perspective, the paper assumes that the key issue is not whether to adopt data-driven technologies in training for safety-critical domains, but how to design them so that innovation remains consistent with the principles of Industry 5.0 and with a human-centred paradigm: technology must enhance the system's capacity to learn from experience and prevent error, without turning the training infrastructure into a control apparatus. It follows that the value of Human State Monitoring Systems (HSMS) does not depend solely on inference accuracy, but also on the ability of the infrastructure to make explicit the purposes, limits, and responsibilities throughout the entire usage cycle. For this reason, the design must incorporate technical and organisational constraints that prevent incompatible reuse and prescriptive interpretations.

The underlying hypothesis is that this balance can only be achieved by shifting the focus from ex post compliance (rules and policies added afterwards) to the governance of the integrated system from the design stage: minimisation and separation of identifiable data, informed and revocable consent, the subject's right to opt out of monitoring, retention policies, traceability and verification, and explicit and verifiable limits of use throughout the system lifecycle. In other words, governance is not a 'regulatory' section at the margins, but a design component that shapes interfaces, information flows, and operational phases within which the technology acquires meaning (Mittelstadt, 2019; NIST, 2023; OECD, 2019). Within this framework are situated the On Watch case study and the Human State Monitoring System (HSMS) prototype, developed and tested in progressively complex educational and simulation contexts (classroom with ECDIS simulator – Electronic Chart Display and Information System, bridge simulation with cooperative roles, interviews / selection), in collaboration with the University of Genoa and the FAIMM Italian Merchant Marine Academy, within the ITS 4.0 programme (MIM, 2025). HSMS integrates multimodal signals (voice, facial and postural cues, breathing, text, and operational interactions) and translates them into probabilistic state indicators (e.g., activation and load) to support informed interpretation during the preparation and final review phases. To avoid disciplinary drift and inequalities, the system is deliberately non-prescriptive: it does not produce individual rankings, does not enable league tables, does not automate operational decisions, and is not designed for worker surveillance purposes, but provides visualisations and signals configurable by scenario and phase, with traceability of sources and human oversight (Ronca et alii, 2023; Liu et alii, 2020; Figg. 2, 3).

The originality of the paper is twofold. First, it proposes an interpretation of training safety as a design and management infrastructure, where spaces, interfaces, and phases constitute an inseparable unit: it is within this unit that errors, information overload, false sense of security, and coordination failures are either produced or reduced. Second, it formalises an operational Designer-in-the-Loop framework to make measurable and verifiable the trade-off between digital innovation and the reduction of inequalities: the adoption of HSMS is governed ex ante (through the assessment of risks of misuse, biases, and access barriers) and ex post (through technical-operational and socio-distributive KPIs), so that trade-offs do not remain implicit but become objects of design, verification, and iterative improvement.

In light of these premises, the paper aims to clarify how the use of HSMS in maritime training can enhance the quality of the final review and learning from error without producing regressive effects in terms of surveillance or inequality. In particular, the paper: a) critically frames the debate on Affective Computing and HSMS in safety-critical domains, highlighting epistemic limits and risks of misuse; b) describes On Watch as a case study, foregrounding the experience architecture, interface choices, and usage scenarios; c) formalises the Designer-in-the-Loop methodological framework with requirements and technical-operational and socio-distributive KPIs for a replicable and transferable ex ante and ex post evaluation. The paper is structured as follows: state of the art; case study; experience architecture; interaction and interfaces; Designer-in-the-Loop framework; protocol and KPIs; preliminary results and discussion; barriers / limitations and transferability; SDGs; conclusions.

The research questions are: 1) which design and governance conditions allow the integration of HSMS into training in safety-critical domains without turning them into prescriptive or disciplinary devices; 2) which experience architecture and interface choices make the system verifiable, controllable, and non-prescriptive across different scenarios; 3) which minimum set of requirements, quality thresholds, and KPIs enables a replicable evaluation and supports transferability to other safety-critical domains.

To address these questions, the paper combines a critical review of the international literature with the analysis of the On Watch case and the operational description of the experimental protocol, making explicit the requirements, constraints, and indicators necessary to replicate the study in other contexts.

State of the art | The adoption of Affective Computing and Human State Monitoring Systems in training within safety-critical contexts intersects three strands: multimodal inference of affective / cognitive states; training and performance assessment in high-criticality environments; and studies on monitoring and surveillance, equity, and data governance. The review is intentionally critical: the objective is not to legitimise automatic scoring, but to clarify epistemic limits, risks of misuse, and design requirements needed to make such systems verifiable and transferable (Picard, 1997; Poria et alii, 2017; D'Mello and Kory, 2015; Ajunwa, Crawford and Schultz, 2017; Eurofound, 2020; Zuboff, 2019). From this perspective, the multimodal nature and the situated character of perceptual / decision-making processes suggest treating results as probabilistic and contextual estimates, supporting the shared construction of meaning in the preparation and final review phases, rather than as

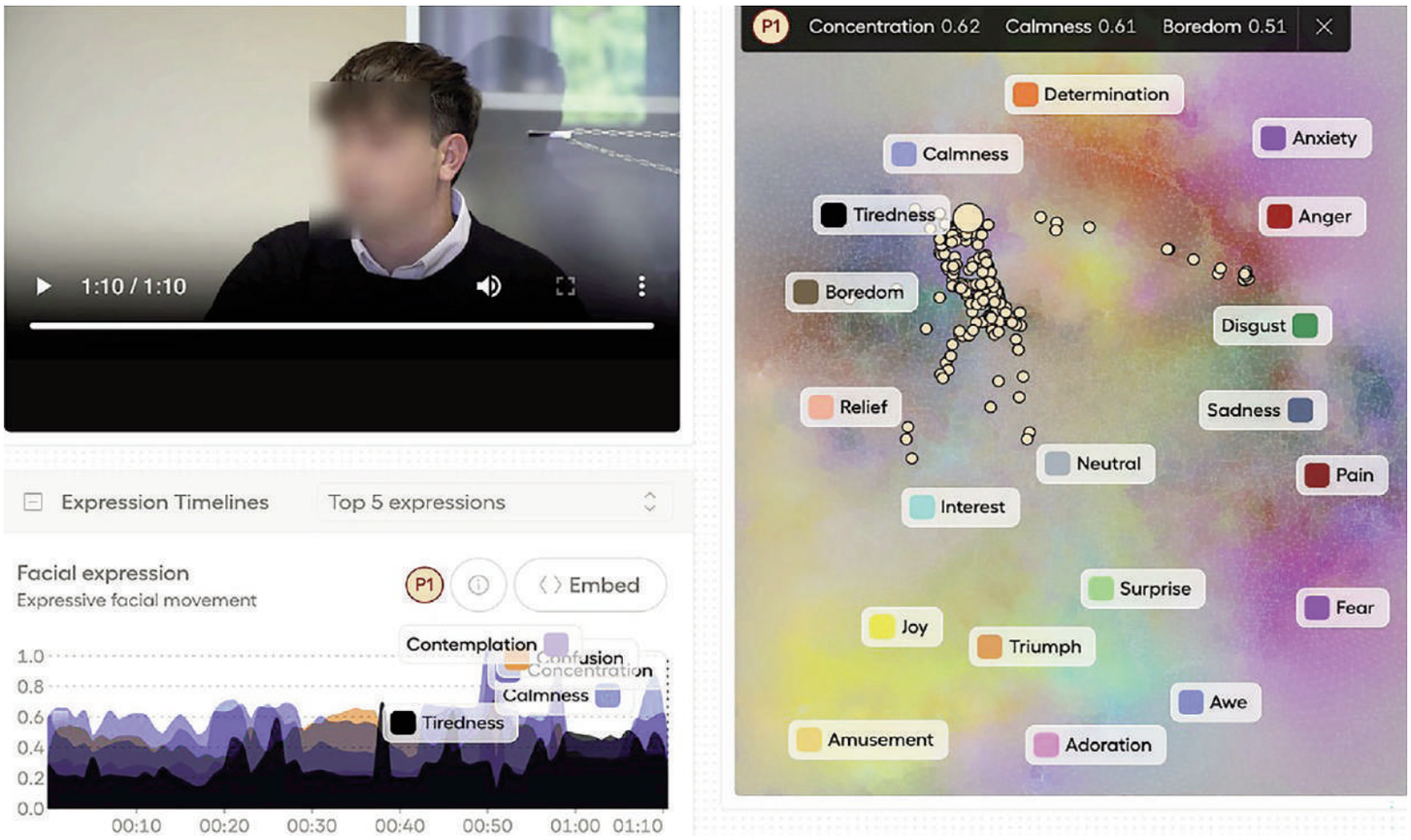


Fig. 8 | ECDIS workstation used in the On Watch pilot for individual simulation and integration of HSMS indicators in debriefing (credit: the Authors, 2026).

prescriptive verdicts (Gazzaniga, 2005). The literature on emotion detection confirms the shift towards multimodal approaches. However, it highlights the heterogeneity of protocols, limited comparability, misalignment between datasets, and generalisation issues, all of which require caution against false precision in safety-critical domains (Zeng et alii, 2009; Koelstra et alii, 2012). Within the human factors strand, the usefulness of HSMS emerges primarily when they are integrated into the pedagogical function of preparation and final review, where the quality of reflection depends more on artefacts, roles, and communicative sequences than on the mere availability of data (Hart and Staveland, 1988; Endsley, 1995; Hancock and Matthews, 2019).

At the application level, several international best practices in simulator-based training show that the use of workload and stress indicators is more robust when anchored to scenarios, markers, and a structured final review, and when measurements are treated as contextual evidence rather than as individual scores. Recent studies in bridge simulation highlight the value of triangulating psychophysiological data with operational observations to interpret workload, stress, and attention, and to critically discuss the limits and reliability of the measures (Wulvik, Dybvik and Steinert, 2020; Ronca et alii, 2023; Xue et alii, 2024). These cases suggest transferable selection criteria: a) high-criticality scenario with explicit roles; b) multimodal data collection with quality checkpoints; c) non-prescriptive feedback in the final review; d) governance that limits disciplinary reuse.

Finally, in the debate on objects and services enhanced by artificial intelligence, attention shifts towards the user experience and design responsibilities: configurability, effective human control, and integration of the data supply chain become conditions for avoiding regressive effects and making systems verifiable (Arquilla and Paracolli, 2023; Osello et alii, 2024; Villani, Romagna and Oddi, 2024), while studies on error design, alienation, and evaluative pressure warn against the risk of transforming training tools into control devices; contributions on the inclusivity of multimodality also suggest interpreting signals as situated evidence to be discussed in the final review rather than as mere labels (Porfirione, Ferrari Tumay and Leggiero, 2024; Vacanti et alii, 2025; Rosmino, 2024; Arquilla and Caruso, 2025; Zehr Gantz et alii, 2025). This underscores the need to prevent surveillance uses across the entire data supply chain, through the governance of an integrated system from the design stage and through socio-distributive evaluations. The AI Act reinforces this approach regarding risk, transparency, and organisational accountability (European Union, 2024).

Case study: On Watch and HSMS | The paper is grounded in the On Watch case study and the HSMS prototype, conceived as an experimental platform to support training and final review in safety-critical contexts. The pilot experimentation was developed with FAIMM – Italian Maritime Academy and the University of Genoa within the ITS 4.0 Challenge 2025 framework (MIM, 2025). The experimentation follows a strategy of increasing complexity across three contexts: a) classroom with an ECDIS simulator; b) cooperative bridge with differentiated roles; c) interview / selection, with more restrictive configurations to reduce stigma and the risk of misuse. In the bridge scenario, the main test uses a 'man overboard' emergency with multiple roles (Fig. 4); the 'full mission bridge' simulator used for the cooperative scenario is illustrated in Figure 5.

Within On Watch, the HSMS prototype integrates multimodal signals (voice, facial and postural cues, respiratory parameters, text, and interactions). It translates them into probabilistic indicators (for example, activation and workload) to support the preparation and final review phases. The system is deliberately non-prescriptive: it does not produce rankings nor automate decisions, but provides configurable visualizations with uncertainty and traceability (Ronca et alii, 2023; Wulvik, Dybvik and Steinert, 2020; Xue et alii, 2024). The use of sensitive signals requires minimisation, pseudonymisation, controlled access, defined data retention periods, and verification procedures, together with clear information and revocable consent, as well as the option not to participate in monitoring; these constraints are embedded in the preparation and final review phases and in the user interface, according to an integrated system governance logic from the design stage.

Architecture of the training experience | In safety-critical contexts, the effectiveness of training depends less on the single exercise and more on the architecture of the experience that frames it: pre-

paration, execution, guided reflection. In the On Watch case, this architecture was designed as an intentional sequence of preparation, scenario, and final review, in which multimodal monitoring is not superimposed on the activity, but positioned at specific points in the flow to maximise training utility and minimise regressive effects (Fanning and Gaba, 2007; Rudolph et alii, 2006; Cheng et alii, 2014). From this perspective, perception-action and post-event reflection capitalise on the brain's tendency to 'fill in' gaps and reconstruct dynamic scenarios, for example, through saccadic suppression and integration with memory and expectations. Hence, the choice to concentrate HSMS on the final review, a phase in which heterogeneous signals can be temporally 're-anchored' to operational events and decisions, reduces the 'false precision' of real-time interpretation and enhances human control.

In the preparation phase, the trainer aligns learning objectives and the scenario, clarifies roles and responsibilities (particularly in cooperative contexts), and explicitly states the conditions of data use as part of the governance of the integrated system from the design stage: training and research purposes, exclusion of disciplinary uses, minimization, pseudonymisation, controlled access, possibility of withdrawal and the option not to participate in monitoring, data retention periods, and traceability. Preparation also serves as a 'psychological contract' to reduce fears of surveillance and to guide the interpretation of the system's outputs as support for the final review. During the scenario, the objective is not to 'measure emotion' as a label, but to observe how emotional and cognitive states emerge and vary under conditions of operational pressure and cooperation. Data collection is structured as a synchronised pipeline for post-session analysis: operational behaviour and interactions; facial and postural signals; vocal and prosodic parameters; verbal content; and communication dynamics. To avoid operational interference, HSMS may generate attention cues configurable by phase and scenario, designed to reduce false alarms without diverting the operator's behaviour.

The final review is the phase in which the infrastructure becomes effectively 'empathetic': a situated reading of the experience is constructed, and decisions, communications, and critical moments are brought into relation. HSMS fully come into play in this phase because they enable anchoring the discussion to temporal and multimodal evidence without turning them into individual scores. From the perspective of preventing drift towards surveillance logics, the final review also serves as a governance safeguard, defining what can be discussed, who can access the visualisations, which data are relevant to the educational purpose, and how they are stored or deleted.

Interaction and interfaces | In the On Watch case, interaction is designed with an explicit assumption: in a safety-critical domain, the user interface must not 'close' interpretation, but enable a verifiable reading of data during preparation and final review. In line with this principle, HSMS interfaces are conceived as interpretative tools aimed at making temporal trends and discontinuities visible, linking them to operational and communicative events, making uncertainty and the provenance of inference explicit, and preserving effective human control, thus preventing prescriptive or disciplinary drift (Parasuraman and Riley, 1997).

The HSMS prototype adopts a limited set of views, designed for the final review (and only marginally for the real-time phase), avoiding synthetic one-dimensional KPIs that tend to turn into evaluation. User interface design may leverage Gestalt principles (proximity, similarity, good continuity, and closure) to group events, markers, and indicators along the timeline, reducing cognitive load and supporting the recognition of patterns without translating into score attribution. For example, grouping by role and phase (similarity), aligning markers with continuous visual trajectories (good continuity), and closing informational gaps with the trainer's notes (closure) support discussion without sliding into rankings.

The default view is a timeline with probabilistic indicators (for example, activation and workload) and scenario markers; an events view allows, by selecting a time interval, the visualisation of operational actions, communications, and role changes, with the possibility of trainer annotations. A multimodal, evidence-based view provides access, when necessary and authorised, to the sources that contributed to the estimate (vocal and prosodic features and aggregated facial and postural cues), accompanied by timestamps and quality metadata. In cooperative contexts, the user interface supports a role-based reading, avoiding competitive comparisons (Fig. 6).

A key requirement is configurability by scenario and phase: ECDIS scenario (with emphasis on workload and decision-making), cooperative bridge (with emphasis on coordination and communication), and interview / selection (with more restrictive configurations to reduce the risk of stigmatisation). Configuration affects temporal granularity, source visibility, and access rules – that is, who can see what and when. This approach constitutes a governance measure of the integrated system from the design stage: the user interface embeds usage limits and access constraints as an integral part of the experience, making functional drift more difficult (Fig. 7). The ECDIS environment used in the pilot is shown in Figure 8.

To ensure traceable accountability, the HSMS prototype makes the provenance and quality of modalities, the transformations (from signal to extracted feature to indicator), and access logs verifiable. Non-prescriptiveness derives from the absence of rankings, the visibility of uncertainty, and the control of source visibility.

Designer-in-the-Loop framework | The Designer-in-the-Loop (DITL) framework proposed in this paper stems from a premise typical of design research applied to complex systems: when a technology enters a safety-sensitive context, it does not simply 'add' to an existing process; rather, it redefines the socio-technical infrastructure that supports learning. In the case of an HSMS, this means intervening simultaneously on rituals (preparation / final review), artefacts (dashboards, logs, reports), expectations (what it is legitimate to infer from data), and power relations (who observes, who is observed, who decides, who can challenge). For this reason, the gap between innovation and the reduction of inequalities cannot be treated as a regulatory appendix: it must become a design requirement, observable and verifiable in practice.

In the ex-ante phase, before activating any data collection, adoption is framed as an exercise in the 'design definition of constraints': purposes and limits are clarified (training and final review, not disciplinary use), the information pipeline is mapped, and risks are translated into experience and interface requirements: configurability by scenario and phase, absence of evaluative scoring, probabilistic indicators with visible uncertainty, traceability of sources, and effective human control, in addition to the integration of rules already at the design stage (Fig. 9).

In the ex-post phase, DITL requires impact to be measured in a bifocal way: on the one hand,

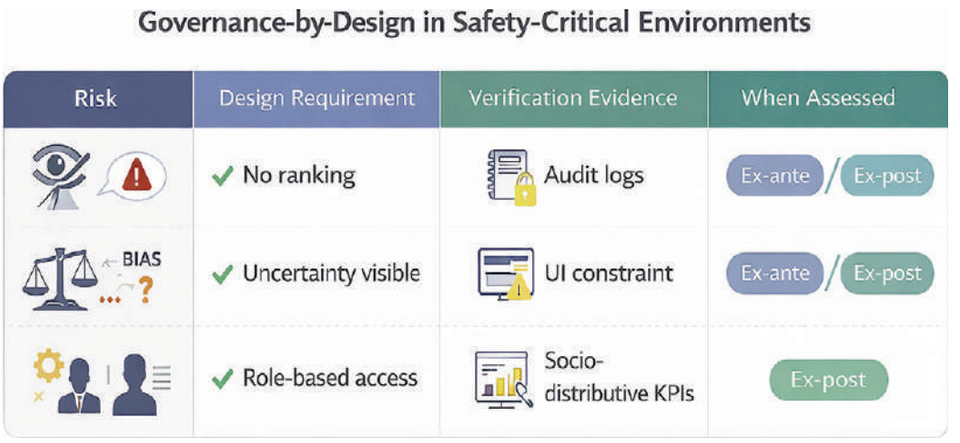


Fig. 9 | Governance-by-design: risk mapping (surveillance drift, bias, stigma / pressure), design requirements, verification evidence, and timing of assessment, ex-ante / ex-post (credit: the Authors; AI-generated with ChatGPT, 2026).

Phase (DITL)	Input data	Operational steps / parameters	Outputs	Constraints & governance	KPIs (operational)	Quality gates / thresholds	Validity & replication conditions
Ex-ante scoping	Scenario briefs; roles; data-map	Define purpose limitation; select modalities per scenario; configure views	Approved protocol + configs	No ranking; opt-out; access control; retention	Protocol completeness; risk register coverage	N/A	Same scripts / configs used across sessions
Briefing	Briefing script; consent form	Explain purpose/limits; assign roles; calibrate devices; verify opt-out	Participants ready; log consent	Consent revocable; pseudonymisation planned	Briefing completeness; comprehension check	Consent recorded; devices pass check	Standardised briefing text / time
Scenario execution	ECDIS task / Bridge MOB / Interview prompts	Run 6-min scenario; capture audio / video / biosignals; mark events	Synced multimodal dataset + event markers	No live scoring; limited live cues	Data completeness; event marker accuracy	Unreliable segments flagged if missing modality >30% or audio clipping >5%	Same scenario script; same room / setup
Debriefing	Timeline + markers + indicators	Review critical moments; annotate; discuss lessons learned	Debrief notes; lessons learned list	Role-based visibility; evidence view on-demand	no. of critical moments discussed; lessons learned count; anchoring to events	Show uncertainty + quality metadata	Same debrief guide; same UI views
Ex-post evaluation	Questionnaires + logs	Compute KPIs; check disparities; update design	KPI report + redesign actions	Audit log; purpose limitation	Acceptability; perceived surveillance; disparity checks	Flag if group-level differences > pre-defined margin	Report template; same questionnaires

Tab. 1 | Methodological synthesis for replicability (On Watch / HSMS).

technical-operational outcomes consistent with SDG 9 are assessed, including the quality of the debriefing in relation to the reconstruction of events, the identification of critical phases, and lessons learned, as well as usefulness for the trainer and the stability and reliability of estimates under realistic conditions; on the other hand, socio-distributive outcomes consistent with SDG 10 are evaluated, including acceptability and trust, perceived surveillance or evaluative pressure, and possible disparities in outcomes between groups under the same scenario. When critical issues emerge, returning to the design phase is essential through modifications to the user interface, indicators, and the preparation / final review sequence, as well as strengthening access constraints. In this way, trade-offs with SDGs 9 and 10 become the object of design iteration and verification.

Validation and replicability protocol | The protocol aims to make the experimentation replicable by assessing the effect of the infrastructure on learning and on the prevention of prescriptive or inequitable drift. Sample and sessions (exploratory pilot): three participants per scenario, three recorded sessions, average duration 6 minutes; objective: feasibility, integration into the final review, and acceptability, not statistical generalisation. The protocol adopts a strategy of increasing complexity, structured across three contexts (classroom/ECDIS, cooperative bridge, interview), each organised into standardised preparation, scenario execution, and a guided final review with HSMS. To meet the requirement of replicability, Table 1 summarises, for each phase, the input data, expected outcomes, constraints, KPIs, quality thresholds, and protocol validity conditions.

Validation involves trainees / participants from FAIMM training programmes and, in the bridge scenario, teams with distinct roles. Selection and inclusion criteria are documented; where relevant, contextual variables (experience, language/accents, conditions that may affect voice or facial expression) are recorded to assess the reliability of results and monitor potential disparities. For each session, data consistent with minimisation and training purposes are collected: audio and video (where applicable), non-invasive physiological parameters, interaction logs, and scenario events. The pipeline is documented in acquisition / synchronisation, feature extraction, and generation of probabilistic indicators with quality metadata. The protocol specifies the points at which pseudonymisation, access control, and operation logging are applied.

To ensure reproducibility of the evaluation, the pipeline includes a quality control process that flags segments with poor signal quality as 'unreliable,' excluding them from summaries and making them visible along the timeline as low-confidence intervals. KPIs are defined as a minimum set: technical KPIs = proportion of reliable / unreliable segments, intra-session stability, temporal consistency with scenario markers; training KPIs = number of critical moments discussed and lessons learned emerging in the final review, quality of reconstruction (anchoring to events / indicators); socio-distributive KPIs = acceptability (trust, perception of surveillance / evaluative pressure), clarity of usage limits, and verification of possible systematic differences between groups under the same scenario.

Evaluation follows the KPI set defined above. The replication package includes: scenario sheets, preparation-phase scripts, final-review structure, HSMS configurations per scenario, definitions of technical and socio-distributive KPIs, and governance procedures (Fig. 10).

Preliminary results and critical discussion | The preliminary results are consistent with the experimental nature of the On Watch case: the objective is not to demonstrate absolute inference accuracy but rather to verify whether the proposed infrastructure can generate training value without triggering regressive effects.

From a technical-operational perspective, the sessions confirm that signal quality is not uniform and depends on practical conditions such as noise, occlusions, distance, lighting, or simultaneous conversations. This leads to the need to manage unreliable segments and to treat results as probabilistic indicators, associating them with quality metadata, thereby reducing false precision and interpretative automatisms. The temporal anchoring of indicators facilitates the reconstruction of key steps and makes the relationship between trends (activation / workload) and operational events open to discussion. The observed effect is consistent with the role of memory and synaptic plasticity: guided reconstruction, anchored to temporal markers, facilitates the strengthening of relevant traces and the restructuring of operational schemas, compared to vague or purely verbal reconstructions. From a training perspective, the most consistent evidence concerns the quality of the final review phase: the use of the HSMS prototype as support enabled the discussion to be structured around identifiable critical moments, reducing vague reconstructions and fostering lessons learned. In cooperative contexts, role- and phase-based reading supports discussion on coordination without producing individual judgments. The presence of temporal evidence facilitates a narrative of error as a resource rather than as a source of blame.

From a socio-distributive perspective, acceptability depends on the interpretative framing in the preparation phase and on interface properties. When purpose and limits are explicitly stated, and visualisations remain non-prescriptive, perceptions of surveillance decrease. In contexts perceived as evaluative, sensitivity to stigma and misuse increases, underscoring the need for more restrictive configurations and for system governance from the design stage. A risk to be monitored concerns potential 'silent' inequitable effects: differences in vocal signals and communication styles may produce differential false alerts; the DITL context requires treating such evidence as criteria for redesign (reducing salience under low-quality conditions and strengthening triangulation).

Limitations, barriers, and critical issues | The introduction of HSMS training in safety-critical domains encounters barriers that are not only technical but, above all, socio-organisational. This paper intentionally adopts a design-oriented perspective: attention is focused on the architecture of the experience, interface choices, and system governance from the design stage, rather than on competition between inference models. This implies a limitation: the results should not be interpreted as a definitive validation of accuracy or diagnostic capability. Moreover, the generalisability of the re-

sults depends on the context of use (simulation or controlled environments), the acquisition setup, and the organisational culture into which the system is introduced.

The most critical barrier is cultural: in many organisations, training operates along a boundary between learning and evaluation; monitoring may be perceived as surveillance, especially in the absence of a culture that treats error as a resource. The risk of drift towards hypersurveillance makes it essential to explicitly define purpose and limits, incorporating constraints (Eurofound, 2020; Ajunwa, Crawford and Schultz, 2017). A second barrier concerns the distributive dimension: cultural and linguistic differences, accents and communication styles, neurodiversity or individual conditions may affect signal quality and the interpretability of results, with the risk of stigma and disparities. For this reason, equity and cognitive accessibility of the user interface must be integrated into the design phase and monitored through socio-

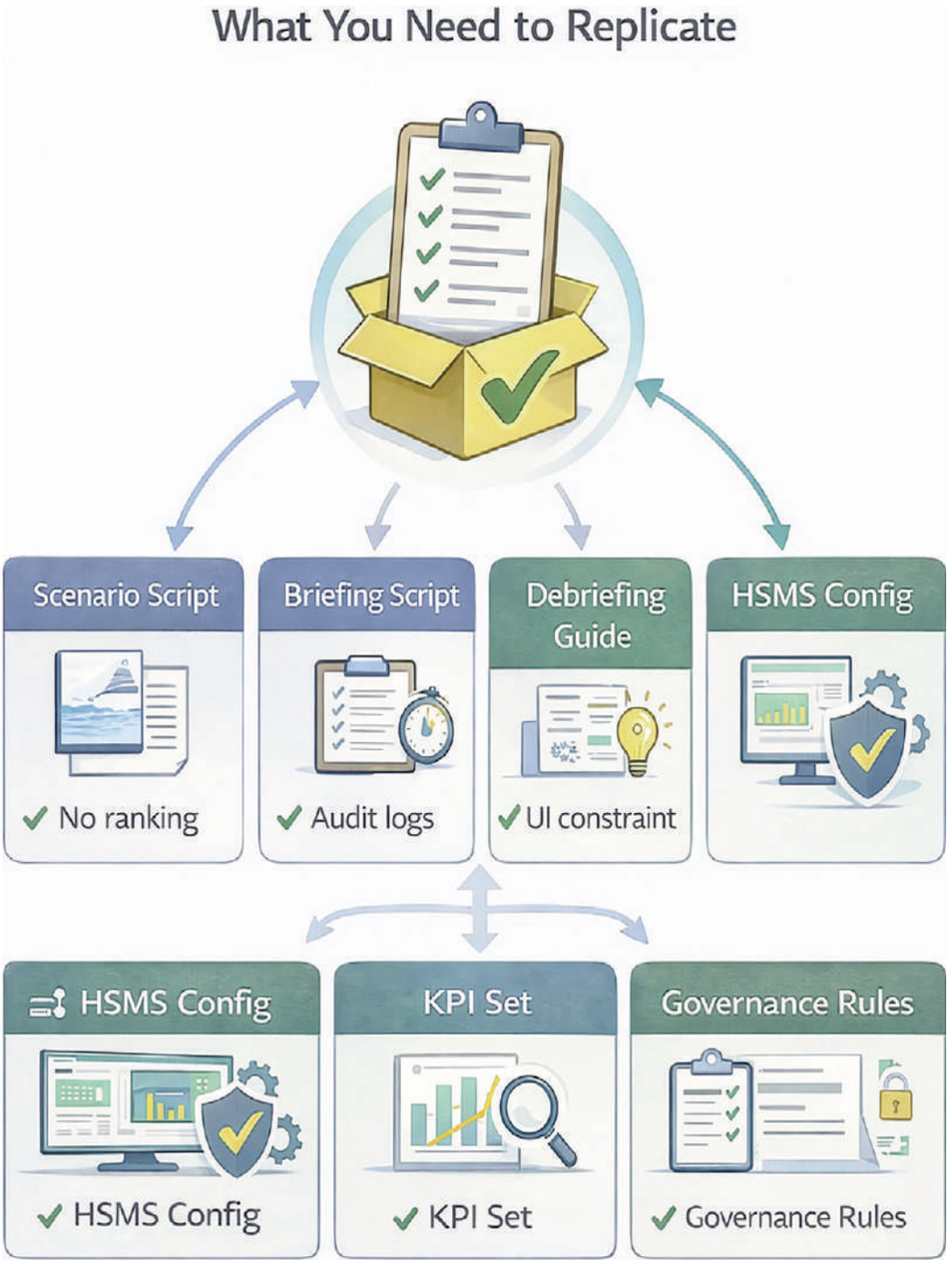


Fig. 10 | Package of minimum artefacts to replicate the study and adoption: scenario / briefing / debriefing scripts, HSMS configuration, KPI set, governance rules (credit: the Authors; AI-generated with ChatGPT, 2026).

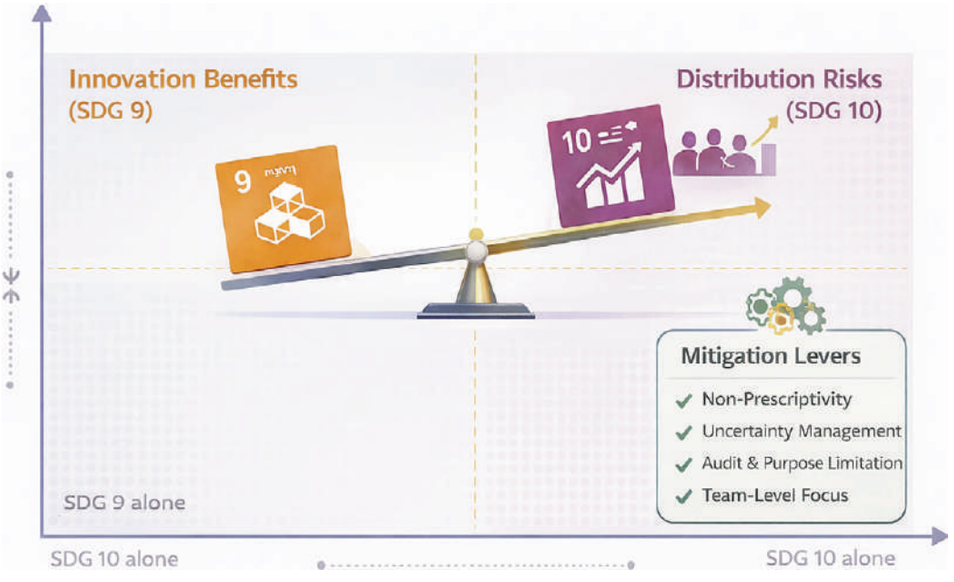


Fig. 11 | Design trade-off between innovation benefits (SDG 9) and distributive risks (SDG 10), with mitigation levers including non-prescriptiveness, uncertainty management, audit / purpose limitation, and team focus (credit: the Authors; AI-generated with ChatGPT, 2026).

distributive KPIs (Buolamwini and Gebru, 2018; Raji and Buolamwini, 2019).

From an economic and operational perspective, diffusion requires infrastructure, maintenance, and interdisciplinary skills; partial adoption, particularly without governance and trainer training, may increase risks. There are also regulatory and accountability barriers related to the management of sensitive data, clarity on access and retention, and the definition of responsibilities for use. Transferability is plausible under minimum conditions: a structured final review, governance integrated into the design, and non-prescriptive interfaces that clearly indicate uncertainty and data traceability (European Union, 2016, 2024).

SDGs: benefits, synergies, and trade-offs | The On Watch case enables operational interpretation of the profile of benefits, synergies, and trade-offs associated with the introduction of non-prescriptive HSMS in maritime training. In terms of direct benefits, the paper primarily falls within the scope of SDG 9, as it proposes an infrastructural innovation in training based on tools that can verifiably support the preparation and final review phases, without translating into automated decision-making or evaluative devices.

With regard to SDG 10, the value of the framework lies in the reduction of distributive risks through a governance approach integrated from the design stage, which clearly defines the purposes of the system, excludes the attribution of evaluative scores, makes uncertainty and the traceability of inferences visible, regulates access to data, and introduces audits and socio-distributive indicators to monitor potential inequitable effects. This is complemented by a relevant contribution to SDG 4, insofar as the system improves the educational quality of the final review and strengthens learning from error, and to SDG 8, as it protects decent work by limiting evaluative pressures and disciplinary uses of data, and by preserving autonomy, dignity, and fair conditions in training and evaluation processes.

Alongside these direct effects, indirect impacts emerge that concern additional sustainable development goals. In particular, the framework may contribute to SDG 3 by supporting operator well-being and the prevention of overload; to SDGs 12 and 13 through a data-sobriety logic based on minimisation, limited retention periods, and the reduction of digital waste; to SDG 16 by strengthening accountability and organisational transparency; and to SDG 17 through the development of partnerships between universities, academies, and sector stakeholders.

However, these benefits do not eliminate trade-offs or residual risks, which may also affect other SDGs, particularly when unequal access to infrastructure persists, distortions in multimodal signals occur, or computational costs are non-negligible. In this sense, potential critical issues that may impact SDGs 1, 2, 5, 7, 11, 14, and 15 should not be considered external or secondary effects, but rather conditions to be governed through design. It is precisely here that the Designer-in-the-Loop framework demonstrates its relevance, as it makes such trade-offs observable, measurable, and governable both ex ante and ex post, through quality thresholds, audits, iterative verification, and continuous design adjustments (Fig. 11). Overall, the results therefore show a clear convergence with SDGs 3, 4, 8, 12, and 16, while also highlighting the need to carefully manage tensions related to surveillance, evaluative pressure, bias, and disparities, so that digital innovation remains aligned with a person-centred training paradigm.

Conclusions | This paper proposes shifting the centre of gravity of the debate on AI and training in safety-critical domains: the question is not 'how accurate is human state recognition', but rather 'which socio-technical infrastructure makes innovation verifiable, useful, and fair'. The analysis of the On Watch case shows that the introduction of a Human State Monitoring System in highly critical training contexts generates value above all when it is designed as an architecture of the experience – preparation, scenario, and final review – and when interfaces are conceived as tools for meaning-making rather than as evaluative devices.

The most significant aspect emerging from the study is that the sustainability of innovation does not depend solely on model performance, but on the project's ability to avoid drift towards surveillance and inequalities. For this reason, system governance from the design stage – ensuring the absence of rankings, a clear and limited definition of purposes, controlled data access, visible uncertainty, and traceability of sources – is an intrinsic design requirement. In this context, infrastructural innovation can produce positive impacts only if accompanied by constraints that protect dignity and equity. Its sustainability requires a shift from an 'I of design' to a 'we of design': the HSMS prototype is, in this sense, an artefact that gains meaning within social practices (preparation and final review) and governance regimes negotiated with trainers and learners. Only a co-designed implementation can reconcile usefulness (SDG 9) and equity (SDG 10).

The transferability of the approach is not tied to a specific manoeuvre or simulator, but to three replicable elements: the design of the training experience as a socio-technical infrastructure centred on preparation and final review; a set of interaction design choices that keep interpretation open and verifiable; and the Designer-in-the-Loop framework as an ex-ante and ex-post method integrating technical-operational and socio-distributive KPIs. Future developments concern: a) robustness and management of variations in the dataset; b) consolidation of metrics and procedures for contextual fairness and low-invasiveness versions; c) formalisation of verification practices, incident reporting, and suspension of use in case of critical issues. Looking ahead, the scientific community is called to evaluate HSMS in training not only through predictive metrics but also through a framework that considers experience, context, and governance as constitutive variables.

Acknowledgements

The research project 'On Watch – Human State Monitoring in maritime training for safety', developed during the 2025-2026 biennium and still ongoing, has been carried out thanks to funding from FAIMM – Italian Maritime Academy of Genoa, as a partner in training and simulation, granted to the University of Genoa (Department of Architecture and Design, DAD, Italy). The institutions involved are the University of Genoa and FAIMM. The Working Group consists of M. I. Zignego (scientific coordination), A. Bertirotti (socio-organisational analysis), P. Gemelli (training and simulation setting), and L. Pagani (HSMS protocol, KPIs, and analysis).

References

Aguinis, H. and Kraiger, K. (2009), "Benefits of Training and Development for Individuals and Teams, Organizations, and Society", in *Annual Review of Psychology*, vol. 60, pp. 451-474. [Online] Available at: doi.org/10.1146/annurev.psych.60.110707.163505 [Accessed 28 March 2026].

Ajunwa, I., Crawford, K. and Schultz, J. M. (2017), "Limitless Worker Surveillance", in *California Law Review*, vol. 105, pp. 735-776. [Online] Available at: doi.org/10.15779/Z38BR8MF94 [Accessed 28 March 2026].

Arquilla, V. and Caruso, C. (2025), "Un approccio di integrazione nativa dell'inclusione nel meta-design – L'esperienza COmeta | Towards native integration of inclusivity in meta-design – The COmeta experience", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 17, pp. 360-373. [Online] Available at: doi.org/10.69143/2464-9309/17252025 [Accessed 28 March 2026].

Arquilla, V. and Paracolli, A. (2023), "Design sull'esperienza dell'utente e sostenibilità degli oggetti con intelligenza artificiale | User experience design and sustainability of AI-infused objects", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 13, pp. 259-268. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/13222023 [Accessed 28 March 2026].

Buolamwini, J. and Gebru, T. (2018), "Gender Shades – Intersectional Accuracy Disparities in Commercial Gender Classification", in Friedler, S. A. and Wilson, C. (eds), *Pro-*

ceedings of the 1st Conference on Fairness, Accountability and Transparency, New York, NY, USA, February 23-24, 2018, Proceedings of Machine Learning Research, vol. 81, pp. 77-91. [Online] Available at: proceedings.mlr.press/v81/buolamwini18a.html [Accessed 28 March 2026].

Cheng, A., Eppich, W., Grant, V., Sherbino, J., Zendejas, B. and Cook, D. A. (2014), "Debriefing for technology-enhanced simulation – A systematic review and meta-analysis", in *Medical Education*, vol. 48, issue 7, pp. 657-666. [Online] Available at: doi.org/10.1111/medu.12432 [Accessed 28 March 2026].

D'Mello, S. K. and Kory, J. (2015), "A Review and Meta-Analysis of Multimodal Affect Detection Systems", in *ACM Computing Surveys*, vol. 47, issue 3, article 43, pp. 1-36. [Online] Available at: doi.org/10.1145/2682899 [Accessed 28 March 2026].

Endsley, M. R. (1995), "Toward a Theory of Situation Awareness in Dynamic Systems", in *Human Factors | The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, vol. 37, issue 1, pp. 32-64. [Online] Available at: doi.org/10.1518/001872095779049543 [Accessed 28 March 2026].

Eurofound (2020), *Employee monitoring and surveillance – The challenges of digitalization*, Publications Office of the European Union, Luxembourg. [Online] Available at: doi.org/10.2806/424580 [Accessed 28 March 2026].

European Union (2024), *Regulation (EU) 2024/1689 of the European Parliament and of the Council of 13 June 2024 laying down harmonized rules on artificial intelligence and amending Regulations (EC) No 300/2008, (EU) No 167/2013, (EU) No 168/2013, (EU) 2018/858, (EU) 2018/1139 and (EU) 2019/2144 and Directives 2014/90/EU, (EU) 2016/797 and (EU) 2020/1828 (Artificial Intelligence Act) (Text with EEA relevance)*, document 32024R1689. [Online] Available at: data.europa.eu/eli/reg/2024/1689/oj [Accessed 28 March 2026].

European Union (2016), *Regulation (EU) 2016/679 of the European Parliament and of the Council of 27 April 2016 on the protection of natural persons about the processing of personal data and on the free movement of such data, and repealing Directive 95/46/EC (General Data Protection Regulation) (Text with EEA relevance),* document 32016R0679. [Online] Available at: data.europa.eu/eli/reg/2016/679/oj [Accessed 28 March 2026].

Fanning, R. M. and Gaba, D. M. (2007), "The role of debriefing in simulation-based learning", in *Simulation in Healthcare | Journal of the Society for Simulation in Healthcare*, vol. 2, issue 2, pp. 115-125. [Online] Available at: doi.org/10.1097/SIH.0b013e3180315539 [Accessed 28 March 2026].

Gazzaniga, M. S. (2005), "Forty-five years of split-brain research and still going strong", in *Nature Reviews Neuroscience*, vol. 6, issue 8, pp. 653-659. [Online] Available at: doi.org/10.1038/nrn1723 [Accessed 28 March 2026].

Hancock, P. A. and Matthews, G. (2019), "Workload and Performance – Associations, Insensitivities, and Dissociations", in *Human Factors*, vol. 61, issue 3, pp. 374-392. [Online] Available at: doi.org/10.1177/0018720818809590 [Accessed 28 March 2026].

Hart, S. G. and Staveland, L. E. (1988), "Development of NASA-TLX (Task Load Index) – Results of Empirical and Theoretical Research", in Hancock, P. A. and Meshkati, N. (eds), *Human Mental Workload*, North-Holland, Oxford, pp. 139-183. [Online] Available at: doi.org/10.1016/S0166-4115(08)62386-9 [Accessed 28 March 2026].

ISO – International Organization for Standardization (2019), *ISO 9241-210:2019 – Ergonomics of human-system interaction – Part 210 – Human-centred design for interactive systems*. [Online] Available at: org/standard/77520.html [Accessed 28 March 2026].

Koelstra, S., Mühl, C., Soleymani, M., Lee, J.-S., Yazdani, A., Ebrahimi, T., Pun, T., Nijholt, A. and Patras, I. (2012), "DEAP – A Database for Emotion Analysis – Using Physiological Signals", in *IEEE Transactions on Affective Computing*, vol. 3, issue 1, pp. 18-31. [Online] Available at: doi.org/10.1109/T-AFFC.2011.15 [Accessed 28 March 2026].

Liu, Y., Lan, Z., Cui, J., Krishnan, G., Sourina, O., Konovessis, D., Ang, H. E. and Mueller-Wittig, W. (2020), "Psychophysiological evaluation of seafarers to improve training in maritime virtual simulator", in *Advanced Engineering Informatics*, vol. 44, article 101048, pp. 1-9. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.aei.2020.101048 [Accessed 28 March 2026].

MIM – Ministero dell'Istruzione e del Merito (2025), *JOB&Orienta 2025 – Programma del Ministero dell'Istruzione e del Merito*. [Online] Available at: mim.gov.it/documents/20182/8952594/Job%26Orienta%2B2025%2B-%2BProgramma%2Bdel%2BMinistero%2Bdell%27Istruzione%2Be%2Bdel%2BMerito.pdf/def37280-0067-4a6b-b1cc-09bdc31897ba?t=1764260799177&version=1.1 [Accessed 28 March 2026].

Mittelstadt, B. (2019), "Principles alone cannot guarantee ethical AI", in *Nature Machine Intelligence*, vol. 1, issue 11, pp. 501-507. [Online] Available at: doi.org/10.1038/s42256-019-0114-4 [Accessed 28 March 2026].

NIST – National Institute of Standards and Technology (2023), *Artificial Intelligence Risk Management Framework (AI RMF 1.0) – NIST AI 100-1*. [Online] Available at: doi.org/10.6028/NIST.AI.100-1 [Accessed 28 March 2026].

OECD (2019), *Recommendation of the Council on Artificial Intelligence*. [Online] Available at: one.oecd.org/document/C/MIN(2019)3/FINAL/en [Accessed 28 March 2026].

Osello, A. Ugliotti, F. M., Rimella, N. and Loddo, F. (2024), "Modelli digitali e linguaggio naturale – Nuove prospettive per interpretare la complessità | Digital models and natural language – New perspectives for interpreting complexity", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 16, pp. 212-219. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/16182024 [Accessed 28 March 2026].

Parasuraman, R. and Riley, V. (1997), "Humans and Automation – Use, Misuse, Disuse, Abuse", in *Human Factors | The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, vol. 39, issue 2, pp. 230-253. [Online] Available at: doi.org/10.1518/001872097778543886 [Accessed 28 March 2026].

Picard, R. W. (1997), *Affective Computing*, The MIT Press, Cambridge, MA. [Online] Available at: doi.org/10.7551/mitpress/1140.001.0001 [Accessed 28 March 2026].

Porfirione, C., Ferrari Tumay, X. and Leggiero, I (2024), "Conoscenza, innovazione e cambiamento – Il potere dell'errore nel design e nei sistemi complessi | Knowledge, innovation, and change – The power of error in design and complex systems", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 16, pp. 232-241. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/16202024 [Accessed 28 March 2026].

Poria, S., Cambria, E., Bajpai, R. and Hussain, A. (2017), "A review of affective computing – From unimodal analysis to multimodal fusion", in *Information Fusion*, vol. 37, pp. 98-125. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.inffus.2017.02.003 [Accessed 28 March 2026].

Raji, I. D. and Buolamwini, J. (2019), "Actionable Auditing – Investigating the Impact of Publicly Naming Biased Performance Results of Commercial AI Products", in *Proceedings of the 2019 AAAI/ACM Conference on AI, Ethics, and Society (AIES '19), Honolulu, HI, USA, January 27-29, 2019*, Association for Computing Machinery, New York, NY, pp. 429-435. [Online] Available at: doi.org/10.1145/3306618.3314244 [Accessed 28 March 2026].

Ronca, V., Uflaz, E., Turan, O., Bantan, H., MacKinnon, S. N., Lommi, A., Pozzi, S., Kurt, R. E., Arslan, O., Kurt, Y. B., Erdem, P., Akyuz, E., Vozzi, A., Di Flumeri, G., Aricò, P., Giorgi, A., Capotorto, R., Babiloni, F. and Borghini, G. (2023), "Neurophysiological Assessment of An Innovative Maritime Safety System in Terms of Ship Operators' Mental Workload, Stress, and Attention in the Full Mission Bridge Simulator", in *Brain Sciences*, vol. 13, issue 9, article 1319, pp. 1-19. [Online] Available at: doi.org/10.339 0/brainsci13091319 [Accessed 28 March 2026].

Rosmino, A. (2024), "Corpi, menti e design – Un approccio integrato per l'innovazione museale | Bodies, minds, and design – An integrated approach to museum innovation", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 16, pp. 278-289. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/16232024 [Accessed 28 March 2026].

Rudolph, J. W., Simon, R., Dufresne, R. L. and Raemer, D. B. (2006), "There's no such thing as 'nonjudgmental' debriefing – A theory and method for debriefing with good judgment", in *Simulation in Healthcare | Journal of the Society for Simulation in Healthcare*, vol. 1, issue 1, pp. 49-55. [Online] Available at: doi.org/10.1097/01266021-200600110-00006 [Accessed 28 March 2026].

Salas, E., Tannenbaum, S. I., Kraiger, K. and Smith-Jentsch, K. A. (2012), "The Science of Training and Development in Organizations – What Matters in Practice", in *Psychological Science in the Public Interest*, vol. 13, issue 2, pp. 74-101. [Online] Available at: doi.org/10.1177/1529100612436661 [Accessed 28 March 2026].

Vacanti, A., De Chirico, M., Crippa, D. and Fagnoni, R. (2025), "Temporalità digitale – La responsabilità dell'Interaction Design nell'alienazione digitale | Digital temporality – The responsibility of Interaction Design in digital alienation", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 17, pp. 336-347. [Online] Available at: doi.org/10.69143/2464-9309/17232025 [Accessed 28 March 2026].

Villani, T., Romagna, G. and Oddi, A. (2024), "Ottimizzare la fruibilità nei musei – Gestione integrata di dati sui modi d'uso dello spazio e dei contenuti culturali | Optimising usability in museums – Integrated management of data on the use of space and cultural content", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 16, pp. 220-231. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/16192024 [Accessed 28 March 2026].

Wulvik, A. S., Dybvik, H. and Steinert, M. (2020), "Investigating the relationship between mental state (workload and affect) and physiology in a control room setting (ship bridge simulator)", in *Cognition, Technology & Work*, vol. 22, issue 1, pp. 95-108. [Online] Available at: doi.org/10.1007/s10111-019-00553-8 [Accessed 28 March 2026].

Xue, H., Haugseggen, Ø., Røds, J.-F., Batalden, B.-M. and Prasad, D. K. (2024), "Assessment of stress levels based on biosignal during the simulator-based maritime navigation training and its impact on sailing route reliability", in *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, vol. 24, article 101047, pp. 1-14. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.trip.2024.101047 [Accessed 28 March 2026].

Zehr Gantz, S., Massari, S., McDonagh, D. and Vokoun, J. (2025), "Affrontare l'insicurezza alimentare – Empatia e Design Thinking per l'apprendimento trasformativo | Addressing food insecurity – Leveraging empathy and Design Thinking to achieve transformative learning", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 17, pp. 384-397. [Online] Available at: doi.org/10.69143/2464-9309/17272025 [Accessed 28 March 2026].

Zeng, Z., Pantic, M., Roisman, G. I. and Huang, T. S. (2009), "A Survey of Affect Recognition Methods – Audio, Visual, and Spontaneous Expressions", in *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 31, issue 1, pp. 39-58. [Online] Available at: doi.org/10.1109/TPAMI.2008.52 [Accessed 28 March 2026].

Zuboff, S. (2019), *The Age of Surveillance Capitalism – The Fight for a Human Future at the New Frontier of Power*, PublicAffairs, New York. [Online] Available at: hbs.edu/faculty/Pages/item.aspx?num=56791 [Accessed 28 March 2026].

Printed in June 2026
by The Factory S.r.l.
via Triburtina n. 912 | 00156 Roma (IT)