

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, produttività 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-pro-







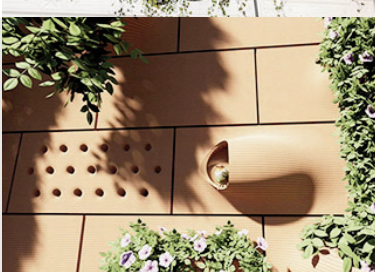
gettazione per Trasformare la Città in un Ecosistema Resiliente e Biodiverso, finanziata nell'ambito del bando UniFI Extra 2025 – Public Engagement dell'Università di Firenze, è stata sviluppata attraverso una collaborazione che ha coinvolto i Dipartimenti di Architettura (DIDA), Biologia (BIO) e Scienze 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 Barcellona, 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 culturale direttamen-

te 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-perfor-

mante, 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 Nadarra¹ – 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 Voltaics², NEST³, Green Klinkers (Wolf, Bauer and Knaack, 2024), Brick by Bit⁴ e FloraVoltaica⁵ – 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 Curiosities⁶, Co-Mida⁷, Aeroponic Aggregate⁸, Vertical Food Farm (Gyawali et alii, 2024), Biomic Wall sviluppato da Contala (Khan, 2023), Voronoi Wall⁹ e il Green Wall¹⁰ di Studio RAP – mostra in-

fine 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-sistemiche 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

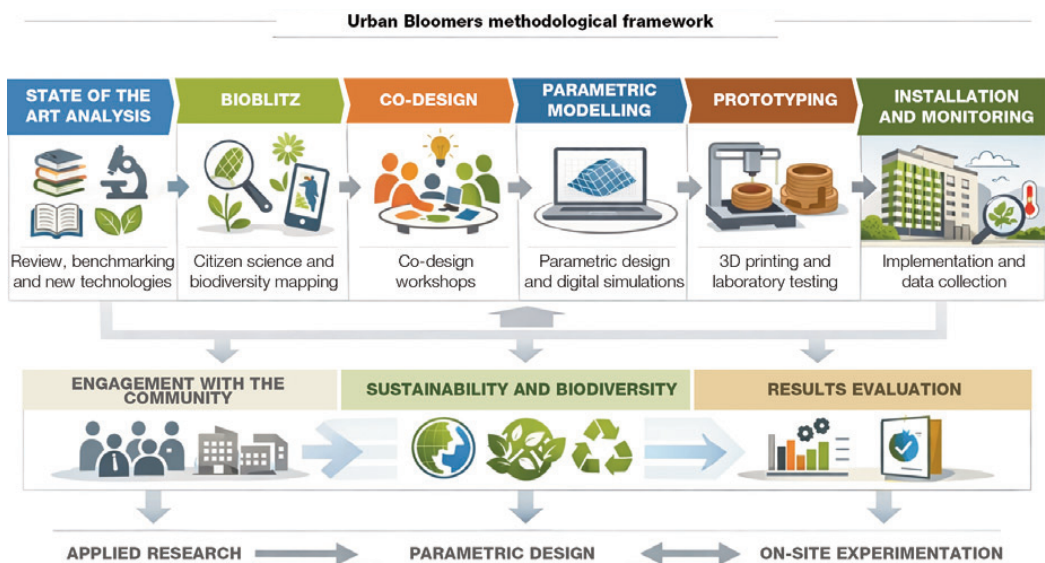


Fig. 2 | Diagram of the methodological framework of the Urban Bloomers research project (credit: the Authors, 2026).

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 com-

battere 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 fotoinsertimenti 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 ar-

gilla (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 rigidità 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-

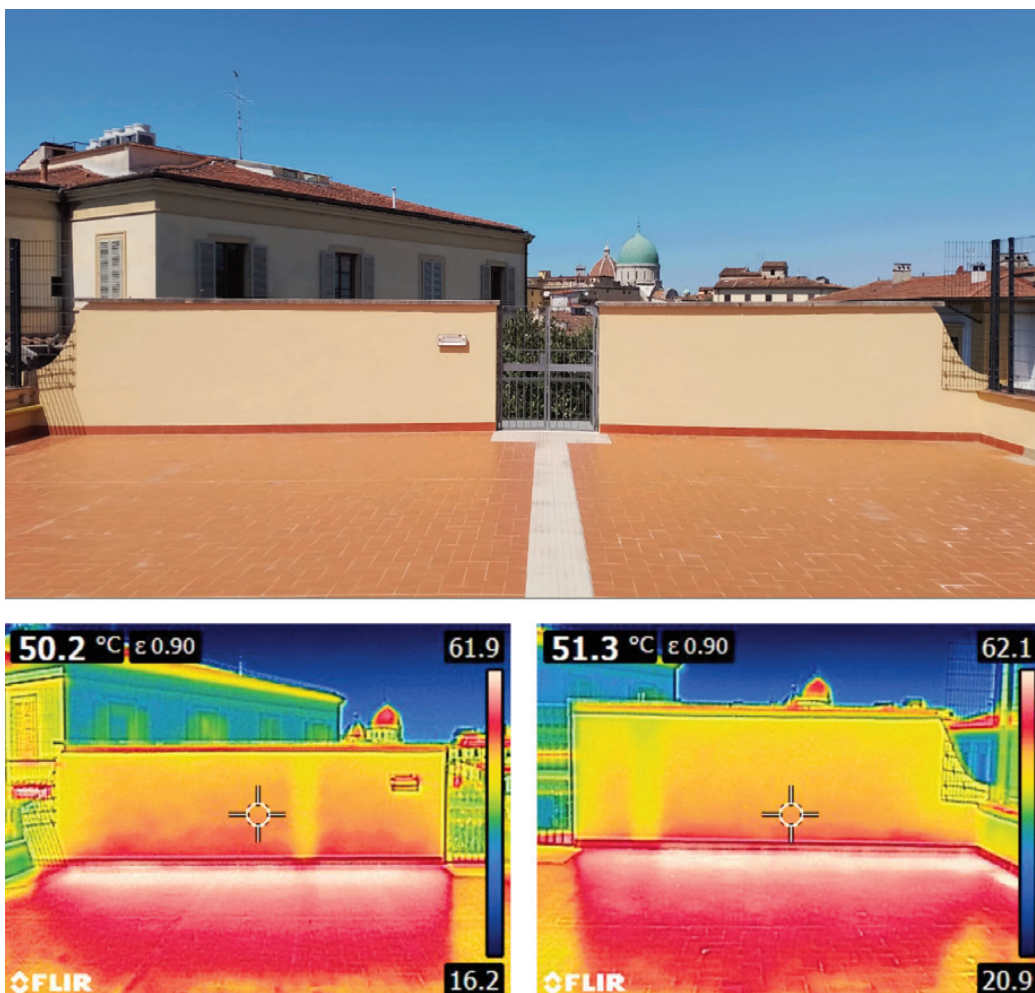
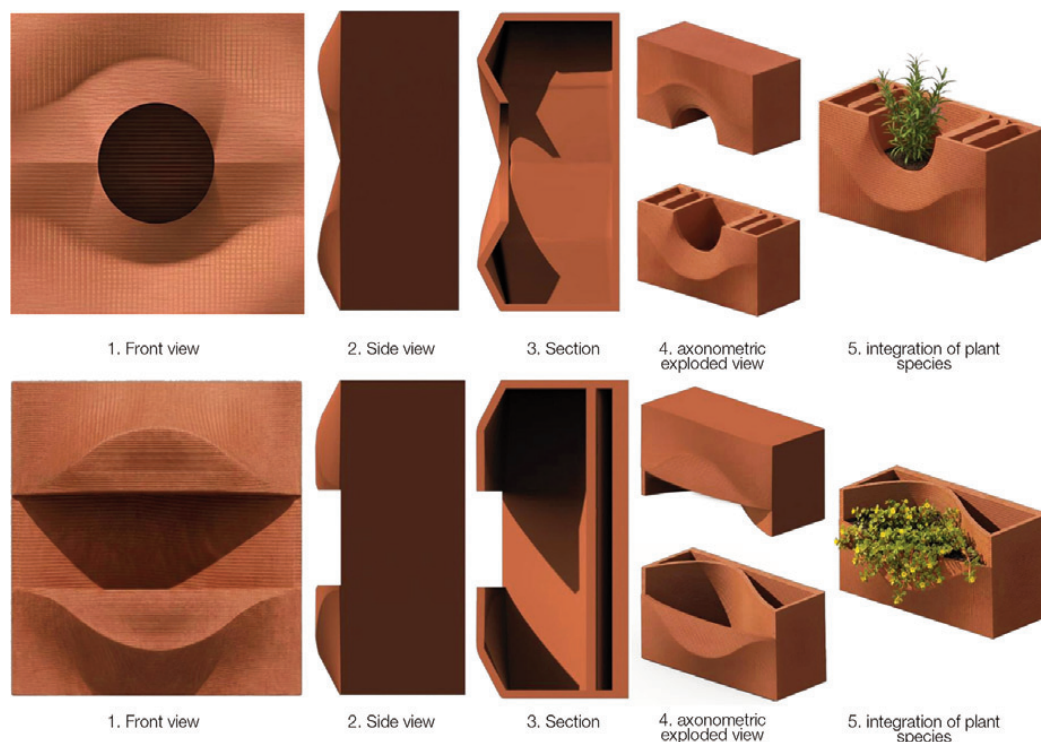


Fig. 3 | Preliminary microclimatic analysis of the Carducci Middle School terrace through photographic documentation and infrared thermographic surveys, aimed at identifying the surface thermal conditions of The Dome Wall system installation site (credit: the Authors, 2026).

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), coeren-

temente 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 pro-

gettuali 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

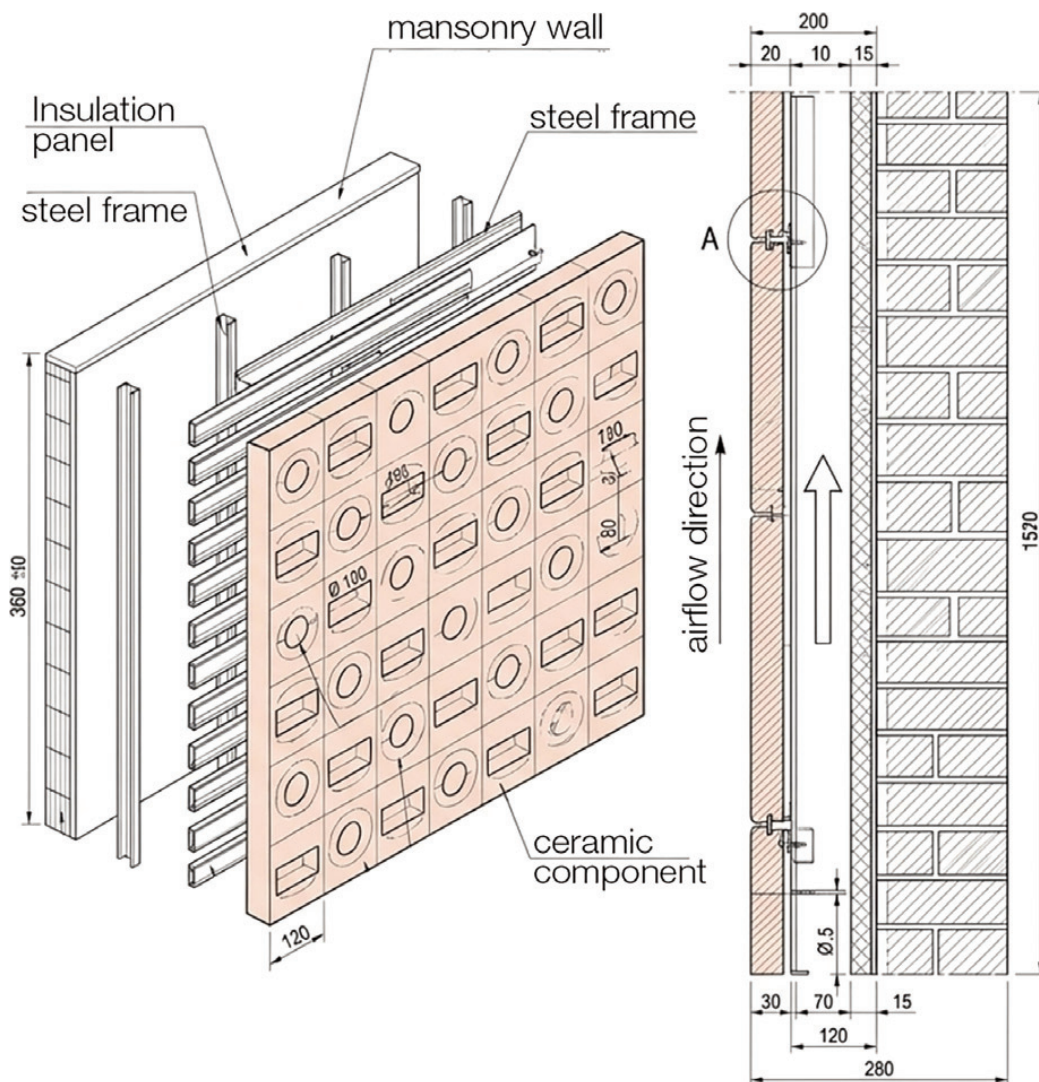


Fig. 5 | Diagram of the fixing system and substructure of The Dome Wall façade system (credit: the Authors, 2026).

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 pre-stazionale, 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; Köiv 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 (Bansnou 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,

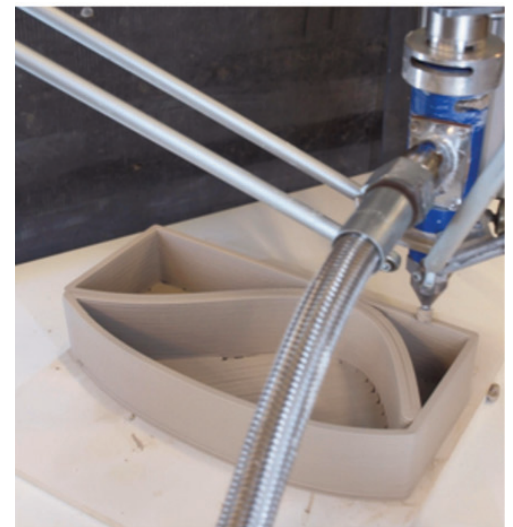
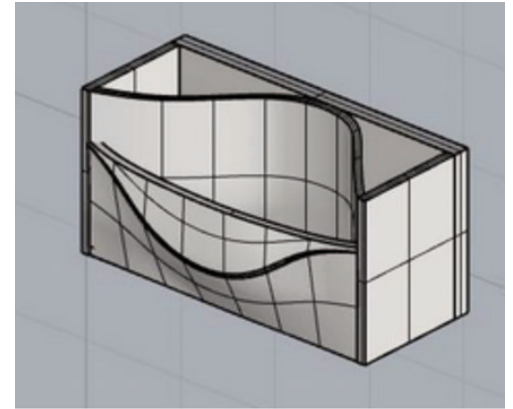


Fig. 6 | From digital model to prototyping: parametric modelling phase and additive production of a sub-component of The Dome Wall system through the Liquid Deposition Modelling process (credit: the Authors, 2026).

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).

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 Naddarra¹ – 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 Voltaics², NEST³, Green Klinkers (Wolf, Bauer and Knaack, 2024), Brick by Bit⁴, and FloraVoltaica⁵ – 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 Curiosities⁶, Co-Mida⁷, Aeroponic Aggregate⁸, Vertical Food Farm (Gyawali et alii, 2024), Biomic Wall developed by Contala (Khan, 2023), Voronoi Wall⁹, and Studio RAP's Green Wall¹⁰ – 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 (Bassou 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 re-

pertoire 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 sub-components 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 above-ground 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 De-

position 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-re-defines-clay-bricks-with-3d-printing/?srsltid=AfmBOooQ-pA0va8iUzyDYLKl8wR6t3cO_S67sNAFX9xsV53pW_IHQgou7 [Accessed 11 April 2026].

5) For more information on the Flora Voltaica 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-curiousities/ [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](https://www.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’efficiamento 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/subs.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., Haghaziar, 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 printing – 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 Hatsum, 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/fevs.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/fevs.2024.1347428 [Accessed 11 April 2026].
- Turrin, M., de Ruitter, P. and Tenpierik, M. J. (2021), “Additive Manufacturing for Integral Design and Engineering”, in Knaack, U., Tessmann, O., Wibraneck, 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., Mazingo, 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., Böhrer, 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].