

## SIMULAZIONE E MODELLAZIONE PER L'ADATTAMENTO E LA MITIGAZIONE CLIMATICA Esperienze di riqualificazione ambientale a Roma

## SIMULATION AND MODELLING FOR CLIMATE ADAPTATION AND MITIGATION Experiences of environmental renovation in Rome

Fabrizio Tucci, Valeria Cecafozzo, Paola Altamura,  
Marco Giampaolletti

### ABSTRACT

Il contributo definisce un approccio metodologico-applicativo originale a supporto della fase sperimentale-progettuale nell'ambito della rigenerazione di distretti urbani, al fine di offrire risposte alle sfide di adattamento e mitigazione dei cambiamenti climatici. La metodologia, applicata in due casi studio a Roma, incorpora e verifica strategie e soluzioni bioclimatiche passive attraverso attività di modellazione/simulazione ex ante/ex post, costruendo modelli progettuali multicriteriali e multiscalarari basati sulla fluidodinamica e misurandone l'efficacia attraverso la quantificazione della riduzione delle emissioni di CO<sub>2</sub>. Risultati attesi sono il miglioramento del comfort ambientale negli spazi outdoor, intermedi e indoor, la riduzione del fabbisogno energetico e la mitigazione delle emissioni di CO<sub>2</sub>, mediante un set di azioni e soluzioni confrontabili, replicabili e misurabili in termini sia di performance-climatico che di benessere ambientale.

This paper defines an original methodological and applicative approach in support of the experimental/planning phase in the area of the regeneration of urban districts, in order to offer responses to the challenges of adapting to and mitigating climate change. Applied in two case studies in Rome, the methodology incorporates and verifies strategies and passive bioclimatic solutions through activities of ex-ante/ex-post modelling/simulation, constructing multicriteria and multiscalar planning models based on fluid dynamics, and measuring their effectiveness through the quantification of the reduction of CO<sub>2</sub> emissions. The expected results are improved environmental comfort in outdoor, in-between, and indoor spaces, lower energy demand and CO<sub>2</sub> emissions mitigation, through a set of actions and solutions that are comparable, replicable, and measurable in terms of energy-climate performance and environmental well-being.

### KEYWORDS

simulazione e modellazione, cambiamenti climatici, decarbonizzazione, riqualificazione energetica, progetto bioclimatico

simulation and modelling, climate change, decarbonization, energy retrofit, bioclimatic design

**Fabrizio Tucci** is a Full Professor of Technology of Architecture at 'Sapienza' University of Rome (Italy), where he is the Director of the PDTA Department. He is also the Coordinator of the 'Stati Generali della Green Economy' in Architecture, and the International Expert Group of the Green City Network. E-mail: [fabrizio.tucci@uniroma1.it](mailto:fabrizio.tucci@uniroma1.it)

**Valeria Cecafozzo**, Architect and PhD, is a Researcher at the PDTA Department of 'Sapienza' University of Rome (Italy). She carries out research activities in the field of technological, bioclimatic, energy, environmental aspects and simulation and modeling. E-mail: [valeria.cecafozzo@uniroma1.it](mailto:valeria.cecafozzo@uniroma1.it)

**Paola Altamura**, Architect and PhD, is a Researcher at the PDTA Department of 'Sapienza' University of Rome (Italy). She carries out research on the ecological effectiveness and circularity of interventions on the built environment. E-mail: [paola.altamura@uniroma1.it](mailto:paola.altamura@uniroma1.it)

**Marco Giampaolletti**, Architect and PhD, is a Research Fellow at the PDTA Department of 'Sapienza' University of Rome (Italy). E-mail: [marco.giampaolletti@uniroma1.it](mailto:marco.giampaolletti@uniroma1.it)



Il nostro pianeta sta vivendo alterazioni ambientali epocali che incidono sempre più sul nostro modo di vivere e abitare; la situazione inoltre si è ulteriormente complicata con l'invasione dell'Ucraina da parte della Russia e con la successiva esplosione della crisi energetica che investe tutti i Paesi con effetti difficilmente prevedibili. In ogni caso la soglia raggiunta in termini di CO<sub>2</sub> pari a 421 ppm, il 50% in più rispetto all'epoca pre-industriale (National Oceanic and Atmospheric Administration, 2022), ci impone un immediato e radicale cambio di passo nell'approccio progettuale con particolare attenzione e sensibilità nei confronti delle risorse ambientali; un nuovo approccio diviene imprescindibile in ogni intervento di rigenerazione e nel raggiungimento del giusto comfort per gli occupanti, mediante strategie passive e attive basate sull'impiego di fonti rinnovabili (Tucci, 2018). Tali profondi cambiamenti richiedono nuovi modelli di sviluppo responsabile e sostenibile in grado di migliorare la qualità della vita nel rispetto dell'ambiente (Battisti and Santucci, 2020). Il settore dell'architettura è al centro di tale cambiamento, reclamando, con forza, un nuovo approccio integrato e trasversale nell'ambito dell'intero processo di programmazione, progetto e produzione, pienamente integrato col portato innovativo della transizione digitale (Abdolhosseini Qomi et alii, 2016).

Indagare il patrimonio edilizio esistente, per oltre il 65% antecedente alla prima legge sul risparmio energetico (ISTAT, 2021), obbliga a rispondere agli impegni assunti in ambito europeo, volti alla riduzione delle emissioni di gas climalteranti – in primis derivanti dai consumi energetici per riscaldamento e raffrescamento – in un'ottica di una non più procrastinabile decarbonizzazione del settore (Kuittinen et alii, 2021; IEA, 2021). La continua innovazione tecnologica ha portato allo sviluppo di software sempre più efficienti, in grado di simulare, con maggior precisione, le caratteristiche reali di comportamento. Ciò consente, all'interno di uno spazio definito 'virtuale', di indagare le prestazioni ambientali ed energetiche di un manufatto edilizio all'interno di un distretto urbano, definendo veri e propri scenari di intervento (Erell, Pearlmutter and Williamson, 2011). Il raggiungimento di elevate performance dei comportamenti fluidodinamici nel comfort indoor e l'idea stessa di 'sostenibilità', rientranti nei crescenti sviluppi degli strumenti di Information and Communication Technology (Maksimovic, 2018), richiedono specifiche analisi reiterate con soluzioni tecniche alternative messe in atto durante il processo decisionale, che necessitano di un ruolo sempre più attivo delle tecnologie digitali e di una progettazione gestita da parametri scientifici (Boeri et alii, 2017).

Obiettivo del presente contributo, nell'ambito degli approcci propri della Progettazione Tecnologica Ambientale, è quello di illustrare i risultati di attività di ricerca mirate a definire indirizzi e strategie per l'utilizzo di sistemi tecnologici ambientali passivi nella rigenerazione di architetture e distretti urbani esistenti con l'ausilio della formulazione di modelli predittivi di calcolo dinamici, di supporto al progetto, articolati in: quadro di dati di riferimento; simulazioni sullo stato dell'arte; valutazioni critiche dei risultati, ottenuti a seguito della adozione di scenari di intervento, modificando reiteratamente assetto e funzioni in modo da offrire sempre elevate prestazioni. Tali modelli innovativi sono

volti a definire soluzioni appropriate in relazione ai risultati di testing e verifica ottenuti dalle simulazioni dinamiche, formulando modelli di intervento adattivi più efficaci nel contesto di riferimento e nelle condizioni micro-climatiche ambientali (Makropoulou and Gospodini, 2016; Santamouris et alii, 2015); l'efficacia della combinazione di strategie di efficientamento energetico con quelle di regolazione degli involucri edilizi rispetto ai fattori ambientali esterni viene verificata quantificando le emissioni di carbonio incorporato e operativo degli edifici (Carrada and Frizza, 2021).

Poiché una rigenerazione sostenibile può realizzarsi solo dopo un'attenta valutazione delle prestazioni del sistema costruito nella sua complessità e della sua impronta di carbonio, è necessario definire una chiara metodologia per quantificare le emissioni. Ad oggi non è disponibile una quantificazione dei contributi alla riduzione delle emissioni derivanti dalla mitigazione del microclima urbano: a ciò si rivolge lo studio che implementa il modello di valutazione associandolo al consumo energetico grazie a simulazioni fluidodinamiche ante e post operam, poste in essere attraverso specifici software che consentono di quantificare e discutere criticamente i risultati ottenuti.

Il contributo presenta i risultati dell'analisi di diverse soluzioni tecnologiche per la rigenerazione urbana dei quartieri di Vigne Nuove e di Casal Monastero a Roma (Fig. 1) nell'ambito dell'attività di ricerca prevista dal PRIN 2017 'Tech Start – Key Enabling Technologies and Smart Environment in the Age of Green Economy – Convergent Innovations in the Open Space/Building Systems for Climate Mitigation', svolta dall'Unità di Ricerca del Dipartimento Pianificazione, Design, Tecnologia dell'Architettura della 'Sapienza' Università di Roma che ha interessato anche altre aree periferiche della Capitale<sup>1</sup>. Le proposte di rigenerazione urbana per i due casi di studio sono orientate alle capacità di inserimento e potenziamento dei sistemi tecnologici ambientali in grado di migliorare gli aspetti di comfort ambientale e di sostenibilità attraverso soluzioni progettuali che mirino a testare i miglioramenti conseguiti, con l'obiettivo primario di incrementare la fruibilità degli spazi pubblici e loro vivibilità elevando la qualità e il benessere ambientale.

#### Metodologia e fasi operative della ricerca |

L'impianto metodologico si fonda sulla più recente letteratura scientifica e su documenti e report internazionali sui sistemi di simulazione progettuale input modelling-simulation-output simulation, al fine di costituire un quadro di riferimento per l'individuazione dei sistemi tecnologici ambientali oggetto di analisi scientifica (input modelling), la definizione di possibili scenari di intervento con la selezione delle soluzioni alternative più idonee in funzione dei risultati di simulazione ottenuti (simulation), infine la definizione di un modello di intervento adattabile ai diversi contesti (output modelling).

La ricerca si è sviluppata attraverso: 1) il reperimento dei dati climatici e dei principali fattori ambientali; 2) l'individuazione delle macro-aree di contesto rappresentative del comportamento bioclimatico dei due distretti urbani; 3) la definizione dei profili ambientali di contesto (materiali superficiali, vegetazione e altezze del contesto urbano) utilizzando l'osservazione diretta e gli stru-

menti di Google Earth e Google Street View; 4) la modellizzazione del microclima delle aree oggetto di studio ex ante, attraverso il software ENVI-met (versione 5.0.3) per valutare in che modo diversi modelli di sviluppo, comprese quantità variabili di pavimentazione e vegetazione, influiscono sulle temperature localizzate; 5) l'elaborazione di parametri ambientali quali la Air Temperature (AT; °C), la Physiological Equivalent Temperature (PET; °C), la Mean Radiant Temperature (MRT; °C) e la Wind Speed (WS; m/s); 6) l'elaborazione di parametri che evidenziano la condizione di benessere psicofisico dell'individuo rispetto all'ambiente cui si trova, il Predicted Mean Vote (PMV) e il Predicted Percentage of Dissatisfied (PPD); 7) la valutazione e discussione degli esiti dei parametri esaminati con le simulazioni dinamiche e valutazione bioclimatico-ambientale sullo stato ante e post operam; 8) l'esame della correlazione tra temperatura dell'aria esterna e consumi energetici degli edifici e la costruzione di un quadro concept di riferimento e definizione dei sistemi tecnologici ambientali che caratterizzano l'intervento di rigenerazione urbana rispettando gli esiti analitici, valutativi e predittivi delle performance attese; 9) la predizione della variazione del consumo di energia per riscaldamento e raffrescamento attraverso lo scostamento della temperatura esterna ante e post per effetto degli interventi volti alla mitigazione del microclima; 10) la definizione dello scenario di intervento e valutazione sulla sua compatibilità con gli obiettivi prefissati e nello sviluppo della sperimentazione progettuale con la scelta di una o più soluzioni secondo una valutazione delle performance bioclimatiche ambientali riferite alle condizioni post operam di intervento; 11) la restituzione del quadro generale delle emissioni di CO<sub>2</sub> derivanti dal sistema costruito complessivo (energia, acqua, rifiuti, mobilità).

**La sperimentazione sul caso del quartiere Vigne Nuove a Roma** | Vigne Nuove è un distretto urbano situato nell'area nord-est della Capitale all'interno del Grande Raccordo Anulare, vicino alle borgate Tufello e Val Melania. Ha una estensione di poco più di 3 kmq, il 3% dell'intero Municipio III (Fig. 2). Il lotto è stato edificato dal 1973 al 1979 dall'Istituto Autonomo Case Popolari (IACP) di Roma con finanziamenti straordinari GESCAL del 1969. Il complesso edilizio, costituito da 524 alloggi per 3.300 abitanti, occupa un'area triangolare di quasi 8 ha che degrada da est a ovest con una pendenza pronunciata.

Il disegno planivolumetrico dell'area è costituito da tre elementi strutturali: un livello stradale, per la mobilità carrabile, parcheggi e aree verdi; un livello sopraelevato, composto da una passerella pedonale che supera il dislivello del terreno sui cui lati sono disposti edifici di uno o due piani che ospitano i servizi e le attrezzature collettive; e, infine, gli edifici residenziali di 7-8 piani (Fig. 3), oltre al porticato e un piano garage posizionati ai margini del lotto per circoscrivere gli spazi interni senza chiudere il perimetro dell'area, cui si aggiungono torri cilindriche esterne al corpo fabbrica contenenti le scale e gli ascensori. L'aggregazione in linea degli alloggi è misurata da una maglia strutturale scandita dall'alternarsi di una campata grande, pari a circa 7,5 metri di interasse e da una piccola di circa 3 metri, dove sono accentrati cucine e bagni e relativi impianti verti-



Fig. 1 | Aerial photo highlighting the Vigne Nuove and Casal Monastero 'Piani di Zona', Rome (credit: the Authors, 2022).

cali in una disposizione che si ripete per tutti i livelli e per tutti i tipi di alloggio e determina il landmark dei prospetti.

Il quartiere ambiva a risanare il tessuto senza regole delle periferie e costituire un polo attrattivo per la presenza di servizi pubblici e privati tali da animare la vita comunitaria. La differenza di quota nell'area ha però rotto la linearità del progetto e generato spazi bui e labirintici che hanno contribuito a rendere il luogo insicuro; poi l'incuria, il degrado e il vandalismo hanno fatto il resto. Gli spazi aperti presenti nel quartiere sono spesso poco mantenuti, di difficile accessibilità e fruibilità dei residenti; l'importante asse stradale di Via Giovanni Conti presenta specie arboree e arbustive principalmente caducifoglie, non in grado di schermare le emissioni degli agenti inquinanti e di costituire una barriera per i venti freddi invernali. Il rivestimento degli edifici è in pannelli di cemento e graniglia di marmo rosa, mentre gli spazi aperti sono caratterizzati da lastre in cemento per i percorsi pedonali e asfalto per i marciapiedi e sedi carrabili, il tutto fortemente degradato (Fig. 4). Il tessuto socio-economico è fragile, stigmatizzato dall'alto tasso di disoccupazione e dalla ridotta presenza di giovani famiglie con figli, tanto che spesso le superfici degli alloggi sono sovradimensionate. I consumi energetici del distretto urbano sono attualmente quantificati in 21.927.058 Kwh/a con emissioni di carbonio definite in 5.443.963 KgCO<sub>2</sub>eq/a.

Il progetto di Vigne Nuove prevede quindi un miglioramento bioclimatico degli spazi aperti, secondo un incremento e una valorizzazione degli stessi mediante potenziamento delle masse ar-

boree e arbustive autoctone e native del luogo, capaci di mitigare il fenomeno delle isole di calore, contribuire fattivamente all'abbattimento delle emissioni di carbonio, favorire ombreggiamento e ridurre il fenomeno del run-off lungo le sedi viarie principali. Il progetto di rigenerazione urbana (Fig. 5) si articola in un potenziamento della mobilità sostenibile mediante incremento delle corse del bus, la sostituzione degli stessi con mezzi a ridotta lunghezza e a trazione elettrica (per collegare il quartiere con i limitrofi poli di scambio – fermata MB1 Jonio, stazione ferroviaria FL1 Nuovo Salaria) e la pianificazione di sedi ciclo-pedonali capaci di collegarsi con le aree limitrofe. Il retrofitting energetico degli edifici si concentra invece sull'aspetto morfo-energetico-tipologico e tecnologico degli stessi, degli spazi interstiziali ed esterni ove introdurre nuove attività per incentivare la socialità e la convivialità degli abitanti anche attraverso forme di condivisione come gli orti sociali.

Ai fini della rilevazione dei parametri ambientali sono state individuate 4 aree, caratterizzate da omogeneità delle caratteristiche morfologiche e identificate tramite l'individuazione di punti chiave baricentrici a ciascuna area, rappresentativi del comportamento microclimatico della struttura urbana e contrassegnati da lettere maiuscole progressive: il punto A in corrispondenza della sede stradale di Via R. Valentino all'altezza del plesso scolastico; il punto B, centrale rispetto alle aree destinate a parcheggio dei residenti poste tra i due edifici in linea; il punto C in corrispondenza dell'entrata del polo sanitario ASL Roma1; il punto D negli spazi aperti e permeabili che caratterizzano attualmente le aree attrezzate del quartiere (Fig. 6).

I risultati delle simulazioni effettuate sull'assetto di progetto sono riassumibili come segue. Nelle aree considerate la Temperatura dell'Aria (AT) diminuisce mediamente in estate di 1,7 °C (da 33,4 a 31,7 °C) e aumenta in inverno di un grado (da 9,4 a 10,4 °C). Nelle aree rilevate, la Temperatura Media Radiante (TMR) presenta invece una diminuzione di 7,8 °C in estate e un aumento di 3,8 °C in inverno. Le soluzioni tecnologiche adottate hanno permesso una riduzione della temperatura percepita in estate di 4,6 °C (da 36,8 a 32,2 °C) e un aumento in inverno di 2 °C (da 5,4 a 7,4 °C). La ventilazione naturale in estate aumenta di 0,5 m/s in tutte le aree, mentre in inverno è meglio controllata nelle aree più esposte, diminuendo di 1 m/s (nei punti A e B) e di 0,5 m/s nelle altre. Per quanto riguarda il benessere psico-fisico dei fruitori, il PMV (Predicted Mean Vote) mediamente diminuisce di 1 punto in estate e aumenta di 1,6 punti in inverno, di conseguenza la percentuale dei fruitori 'insoddisfatti' (PPD) scende in media dall'85% al 62% in estate e dal 47% al 28% in inverno (Fig. 7).

#### La sperimentazione sul caso del quartiere Casal Monastero a Roma

Casal Monastero è un piccolo quartiere alla periferia nord-est della Capitale ricadente nel Municipio IV, all'esterno del Grande Raccordo Anulare (GRA) e confina a sud con la Via Tiburtina (Fig. 8). Ha una estensione di 74 ha, il 2% dell'intero Municipio IV. Il quartiere è realizzato alla fine degli anni Novanta come nucleo di case costruite in cooperativa e finanziate dalla Regione, nella zona adiacente alla Via di Sant'Alessandro. Gli edifici sono quindi di relativa recente costruzione (Fig. 9), a pilotis e con l'involucro delle facciate in cortina, mentre gli spazi aperti sono caratterizzati da lastre in graniglia di cemento per i percorsi pedonali, lastre di basalto per i marciapiedi e asfalto per le sedi carrabili (Fig. 10). Essendo di recente progettazione, il quartiere offre una buona vivibilità non disgiunta da un senso di abbandono e di isolamento a causa della distanza dal centro e per la cesura rappresentata dal GRA. Le costruzioni presenti nella spina centrale (Viale Ratto delle Sabine) non superano i sei piani con il piano terra destinato a servizi; gli edifici non sono addossati e per la maggior parte la tipologia è quella delle villette a schiera con un piccolo giardino.

Diverse sono le criticità e tra queste un inadeguato livello di trasporti pubblici (sono presenti solo due linee di autobus che transitano con poca frequenza e manca prolungamento della linea B della metropolitana), mancano spazi per l'aggregazione sociale, i negozi sono limitati a quelli per i beni essenziali, i servizi primari lasciano a desiderare, mentre è solo informale il sentiero ciclo-pedonale che consente di arrivare a Torraccia, oltre il GRA. I consumi energetici del distretto urbano sono attualmente quantificati in 20.910.933 Kwh/a con emissioni di carbonio definite in 7.324.053 KgCO<sub>2</sub>eq/a.

Il progetto di rigenerazione di Casal Monastero (Fig. 11) si definisce secondo la concezione di un boulevard quale asse centrale del quartiere, che riorganizza la mobilità introducendo piste ciclo-pedonali e navette elettriche in grado di collegare il quartiere, attualmente fortemente isolato, ai limitrofi poli di scambio (fermata MB1 Rebibbia, stazione ferroviaria Linea Roma-Sulmona-Pesca 'Tor Sapienza'). La valorizzazione degli spazi aperti pre-

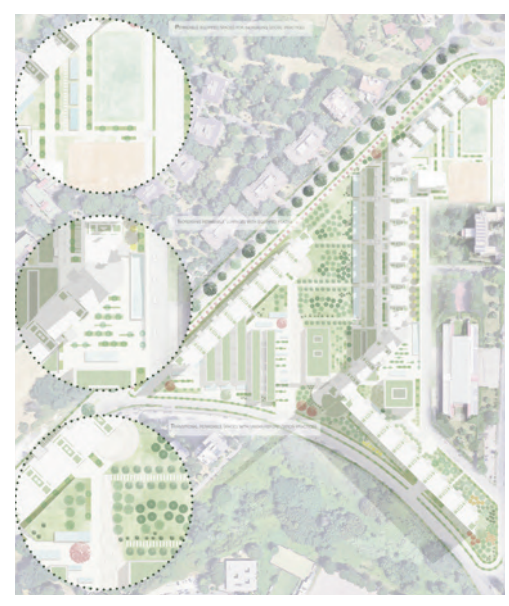
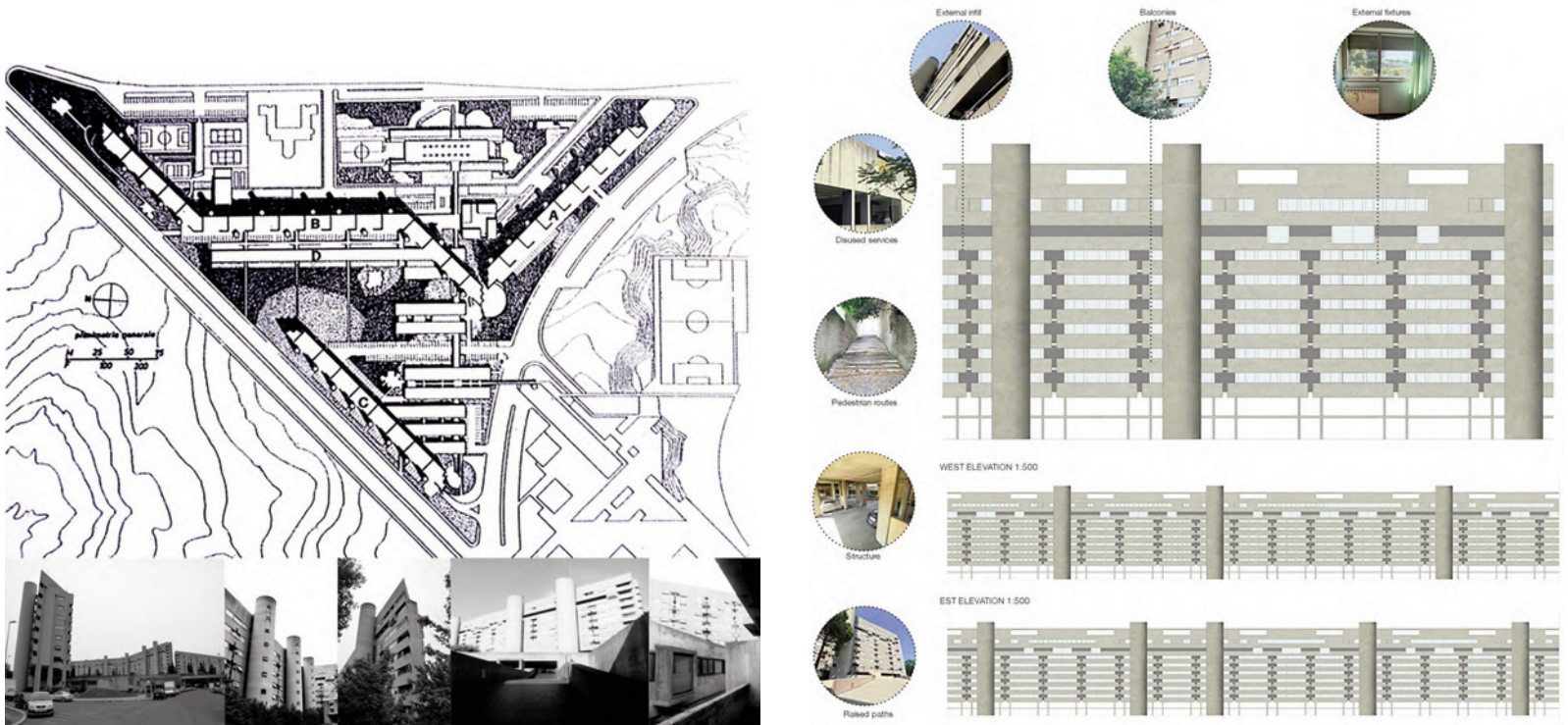


Fig. 2 | Planimetry of the Vigne Nuove 'Piano di Zona' (Rome) and views of the urban fabric (credit: the Authors and C. Dalsasso, 2021-2022).

Fig. 3 | Elevations of the typical building in the Vigne Nuove 'Piano di Zona', Rome (credit: the Authors and C. Dalsasso, 2021-2022).

Fig. 4 | Mapping of the materials and the outdoor spaces ante and post operam of the Vigne Nuove 'Piano di Zona', Rome (credit: the Authors and C. Dalsasso, 2021-2022).

Fig. 5 | Urban regeneration proposal for the Vigne Nuove 'Piano di Zona', Rome (credit: the Authors and C. Dalsasso, 2021-2022).



Fig. 6 | Ante operam fluid dynamics simulations of the Vigne Nuove 'Piano di Zona', Rome (credit: the Authors and C. Dalsasso, 2021-2022).

vede una riqualificazione degli stessi, l'introduzione e/o potenziamento delle specie arboree e arbustive native del luogo in grado di migliorare l'abbattimento delle emissioni di carbonio del distretto urbano e l'aumento delle superfici permeabili attraverso una sensibile riduzione degli assi stradali presenti. La riqualificazione energetica degli edifici individua quale asse strategico l'incremento della produzione di energia da fonti rinnovabili, un miglioramento energetico delle strutture edilizie presenti e delle condizioni di comfort termoisometrico mediante coperture a tetto verde e con tegole. Si prevede inoltre il recupero e la gestione delle acque grigie e meteoriche attraverso il potenziamento dell'impianto di depurazione del quartiere

a fini di irrigazione e riutilizzo per i servizi igienici degli alloggi presenti.

Per la rilevazione dei parametri ambientali sono stati individuati, in funzione dello schema urbanistico, 5 aree del distretto in esame e altrettanti punti baricentrici a queste con modalità analoghe a quelle indicate per Vigne Nuove in termini di omogeneità (i punti sono contrassegnati con lettere maiuscole progressive): il punto A sud del distretto, nello spazio aperto permeabile prospiciente Viale Ratto delle Sabine; il punto B nell'intersezione tra l'asse viario centrale (Viale Ratto delle Sabine) e Via Monteleone Sabino che risente del limitrofo 'Parco del Sole'; il punto C all'interno degli spazi di corte che caratterizzano la porzione

di edilizia residenziale pubblica; il punto D nel punto di intersezione tra l'asse viario centrale, Via Camilla Virginia Savelli e l'adiacente al Parco attrezzato 'V. Savelli'; il punto E nello spazio aperto impermeabile situato a Nord del distretto, destinato a parcheggi (Fig. 12).

Il progetto di rigenerazione urbana e il rimboschimento con funzione di schermo e di miglioramento del comfort microclimatico, hanno permesso una riduzione della Temperatura dell'Aria (AT) nel periodo estivo di 1 °C (da 30,5 a 29,5 °C) e un aumento di 0,7 °C in inverno (da 9,9 a 10,6 °C). La Temperatura Media Radiante (TMR) passa da 67 a 61 °C in estate e da 41 a 46 °C in inverno. Le pratiche di rimboschimento urbano, seguite

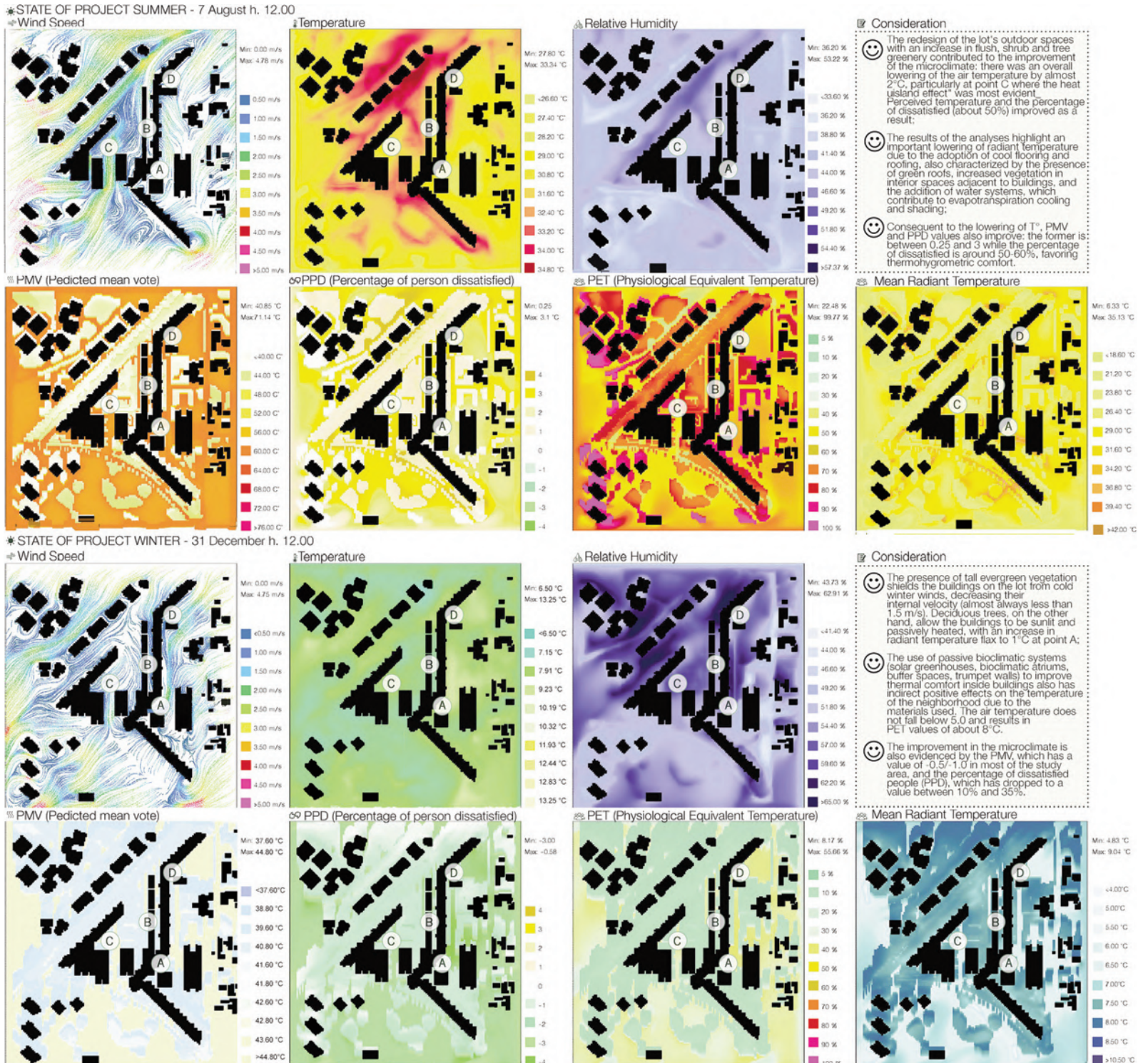


Fig. 7 | Post operam fluid dynamics simulations of the Vigne Nuove 'Piano di Zona', Rome (credit: the Authors and C. Dalsasso, 2021-2022).

da un consistente incremento delle aree permeabili e valorizzazione delle esistenti, hanno permesso una riduzione della temperatura percepita in estate di 1,1 °C nelle aree A e D, di 0,7 °C in C, 0,5 °C in E e 0,4 °C in B, mentre in inverno si registra un aumento medio di 0,80 °C in ogni area del distretto analizzato. Si rileva inoltre, nel periodo estivo, un aumento della Ventilazione Naturale (WS) di 1,1 m/s nel punto B e da 0,1 a 0,6 m/s nelle altre aree, mentre in inverno aumenta mediamente di 0,6 m/s. Relativamente alle condizioni di benessere psico-fisico dei fruitori, il PMV mediamente diminuisce di 1,2 in estate e aumenta di 0,5 in inverno; la percentuale dei fruitori 'insoddisfatti' (PPD) si riduce in media in estate dal 100 al

77% nel periodo estivo e dal 75 al 72% in inverno (Fig. 13).

**Discussione dei risultati** | Per entrambi i casi di studio, Vigne Nuove e Casal Monastero, la sperimentazione ha evidenziato l'efficacia della soluzione progettuale proposta consistente nel miglioramento delle condizioni microclimatiche, nell'efficientamento degli involucri edilizi avvalendosi di tecnologie passive, nell'introduzione di dispositivi a risparmio energetico e di impianti di illuminazione pubblica e privata a LED (Figg. 14, 15) che possono sintetizzarsi nella riduzione dei consumi energetici del 70% (2.189.922 Kwh/a) per Vigne Nuove (Fig. 16) e dell'85% (2.121.119 Kwh/a) per

Casale Monastero (Fig. 17), con una contrazione rispettivamente del 60% (2.121.119 KgCO<sub>2</sub>eq) e del 72% (2.080.324 KgCO<sub>2</sub>eq) delle emissioni di carbonio. Tale richiesta energetica può essere interamente soddisfatta da sistemi integrati per la produzione di energia da fonti rinnovabili quali fotovoltaico, solare e eolico, posti principalmente nelle coperture degli edifici, nonché da un recupero di energia proveniente dalla gestione della biomassa degli spazi aperti, dalla frazione organica inerente al ciclo dei rifiuti del distretto e dal recupero di olio vegetale esausto.

**Conclusioni e prospettive della ricerca** | Il presente contributo illustra i risultati dell'applicazione

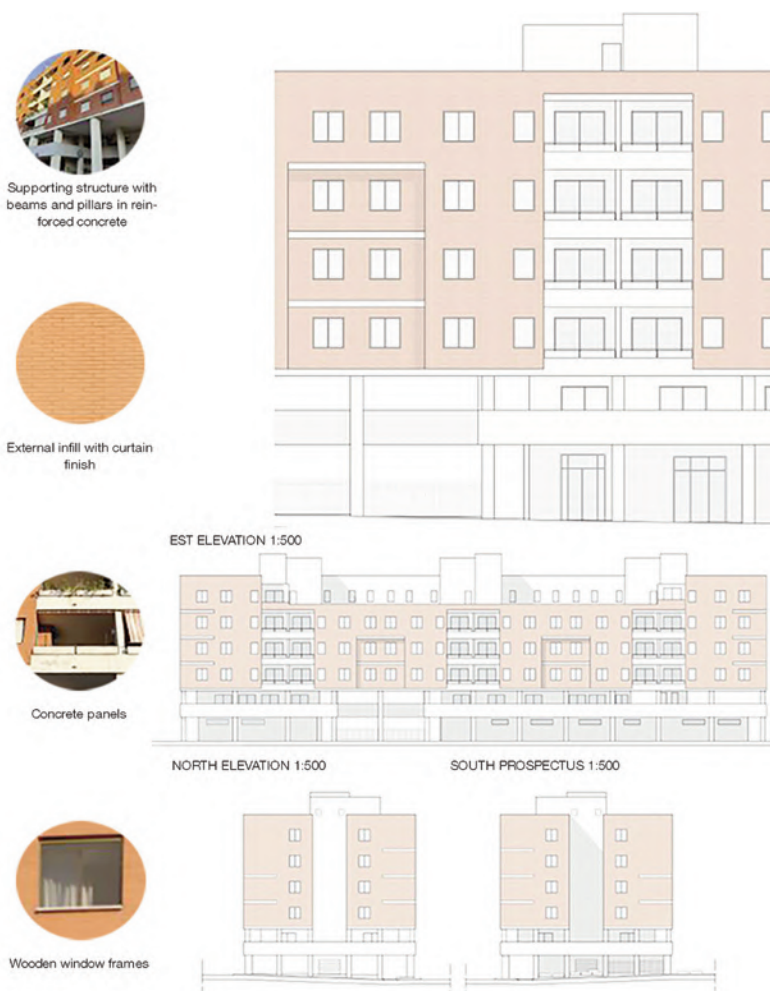


di modelli di calcolo predittivi multiscalari e multi-criteriali di carattere tecnologico-ambientale nel progetto di architettura, con l'obiettivo di offrire risposte alle sfide dell'adattamento e della mitigazione del cambiamento climatico, da conseguire attraverso la loro replicabilità in altri contesti aventi analoghe caratteristiche. In tal modo si mira a dare alla sperimentazione il carattere di testing e verifica in una costante evoluzione in progress dell'approccio metodologico.

L'abbattimento delle emissioni di gas serra, secondo un orientamento scientifico consolidato e confermato dalla presente ricerca, richiede un approccio olistico in grado di ridurre al minimo l'utilizzo di risorse fossili e gli impatti sull'ambiente, la cui efficacia è incrementata da un'accurata valutazione del sistema costruito e conoscenza del suo comportamento prestazionale. In tal senso il ricorso alla simulazione e modellazione può supportare la definizione di adeguate risposte in termini ambientali ed energetici. I modelli sviluppati in quest'ottica sono infatti destinati ad assumere una centralità nella progettazione ambientale, permettendo la misurazione di fattori quali-quantitativi (Tabb. 1, 2). Al riguardo si evidenzia il profilo innovativo dell'approccio metodologico, sviluppato quale quadro di riferimento a supporto della fase sperimentale-progettuale (attraverso attività di input modelling/simulation ex ante e output modelling/simulation ex post) per la costruzione di modelli progettuali con approccio multiscalare e con carattere tecnologico-ambientale, finalizzati a garantire simultaneamente il miglioramento del comfort ambientale negli spazi outdoor, intermedi e indoor in ottica di adattamento agli impatti del cambiamento climatico, e la riduzione del fabbisogno energetico, ai fini dell'abbattimento delle emissioni di CO<sub>2</sub> e dunque di mitigazione delle cause del cambiamento climatico nell'ambiente costruito (Tabb. 3, 4).

Il contesto globale del settore delle costruzioni si sta orientando verso una transizione energetica e socio-economica improntata al risparmio dei consumi, della riduzione delle emissioni e della completa circolarità delle risorse, indirizzando la programmazione della politica nazionale e internazionale a supporto della rigenerazione di aree urbane. Gli scenari progettuali proposti per i distretti urbani esaminati esemplificano proprio l'implementazione di tale nuovo approccio. Si evidenzia inoltre come la progettazione tecnologica ambientale, anche nella fase di sperimentazione sui due quartieri di edilizia residenziale pubblica, sia fattore chiave per la valorizzazione dell'ambiente costruito, mostrando importanti soluzioni tecnologiche negli aspetti bioclimatici, energetici e termici e nelle soluzioni di controllo e ottimizzazione del microclima degli spazi aperti.

La costruzione di scenari di rigenerazione urbana, supportata dai risultati di simulazioni fluidodinamiche mirate, ha permesso infine di valutare soluzioni, metodologie, procedure e strumenti di applicazione in grado di indirizzare correttamente gli interventi secondo gli assi strategici di innovazione tecnologica e adattamento climatico. Tale metodologia, definita secondo i concetti di confrontabilità, innovatività e sostenibilità, permette quindi di indagare i temi di applicabilità e efficacia delle strategie proposte in termini di ricadute sul tessuto economico e sociale dell'area oggetto di intervento, con il fine ultimo di proporre soluzioni



confrontabili, replicabili e misurabili in termini di performance e benessere.

Rispetto alle potenziali ricadute della ricerca, si evidenzia come il tema risulti di grande rilevanza scientifica alla luce delle strategie e delle politiche europee e nazionali, illustrate nel Piano NextGenerationEU<sup>2</sup> e nel Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza (Repubblica Italiana, 2021). In tal senso si rileva l'importanza degli impatti positivi conseguibili tramite la definizione di una metodologia progettuale replicabile nei numerosi distretti urbani che, a livello nazionale ed europeo, presentino caratteristiche simili nell'ambito urbano e che, auspicabilmente, verranno coinvolti nei processi di rigenerazione urbana attivabili con i fondi di cui ai Piani succitati.

In questa ottica lo sviluppo di ricerca principale aperto dal presente contributo riguarda l'affinamento progressivo dei modelli per la quantifi-

cazione della riduzione dei consumi energetici degli edifici e delle relative emissioni climalteranti, ottenibile con strategie di mitigazione delle condizioni del microclima urbano negli spazi esterni e intermedi. Infine un'ulteriore prospettiva di ricerca aperta dal presente lavoro concerne il tema della disponibilità dei dati sulle emissioni climalteranti, incorporate e operazionali, nel settore nazionale delle costruzioni, al fine di una maggiore affidabilità dei dati di input, con più forte rappresentatività a livello locale, nei modelli di valutazione e verifica delle prestazioni.

Our planet is undergoing momentous environmental changes that are increasingly impacting our way of living and dwelling. The situation is also further complicated by Russia's invasion of Ukraine,

with the ensuing explosion of the energy crisis impacting all countries and bringing effects difficult to foresee. In each case, the threshold reached in terms of CO<sub>2</sub> equal to 421 ppm, 50% more than during the pre-industrial period (National Oceanic and Atmospheric Administration, 2022) requires us to immediately and radically change course in the approach to design to which to devote attention and sensitivity as relates to environmental resources; a new approach becomes essential in carrying out any regeneration intervention and attaining the right comfort for the occupants, by means of passive and active strategies based on the use of renewable sources (Tucci, 2018). These profound changes require new models of responsible and sustainable development, capable of improving quality of life while respecting the environment (Battisti and Santucci, 2020). The architecture sector is at the centre of this change, forcefully



**Fig. 10** | Mapping of the materials and the outdoor spaces ante and post operam of the Casal Monastero 'Piano di Zona', Rome (credit: the Authors and S. Urbinati, 2021-2022).

**Fig. 11** | Urban regeneration proposal for the Casal Monastero 'Piano di Zona', Rome (credit: the Authors and S. Urbinati, 2021-2022).



Previous page

**Fig. 8** | Aerial photo of the Casal Monastero 'Piano di Zona' and views of the urban fabric, Rome (credit: Cartoteca PDPA, 'Sapienza' University of Rome).

**Fig. 9** | Elevations of the typical building in the Casal Monastero 'Piano di Zona', Rome (credit: the Authors and S. Urbinati, 2021-2022).



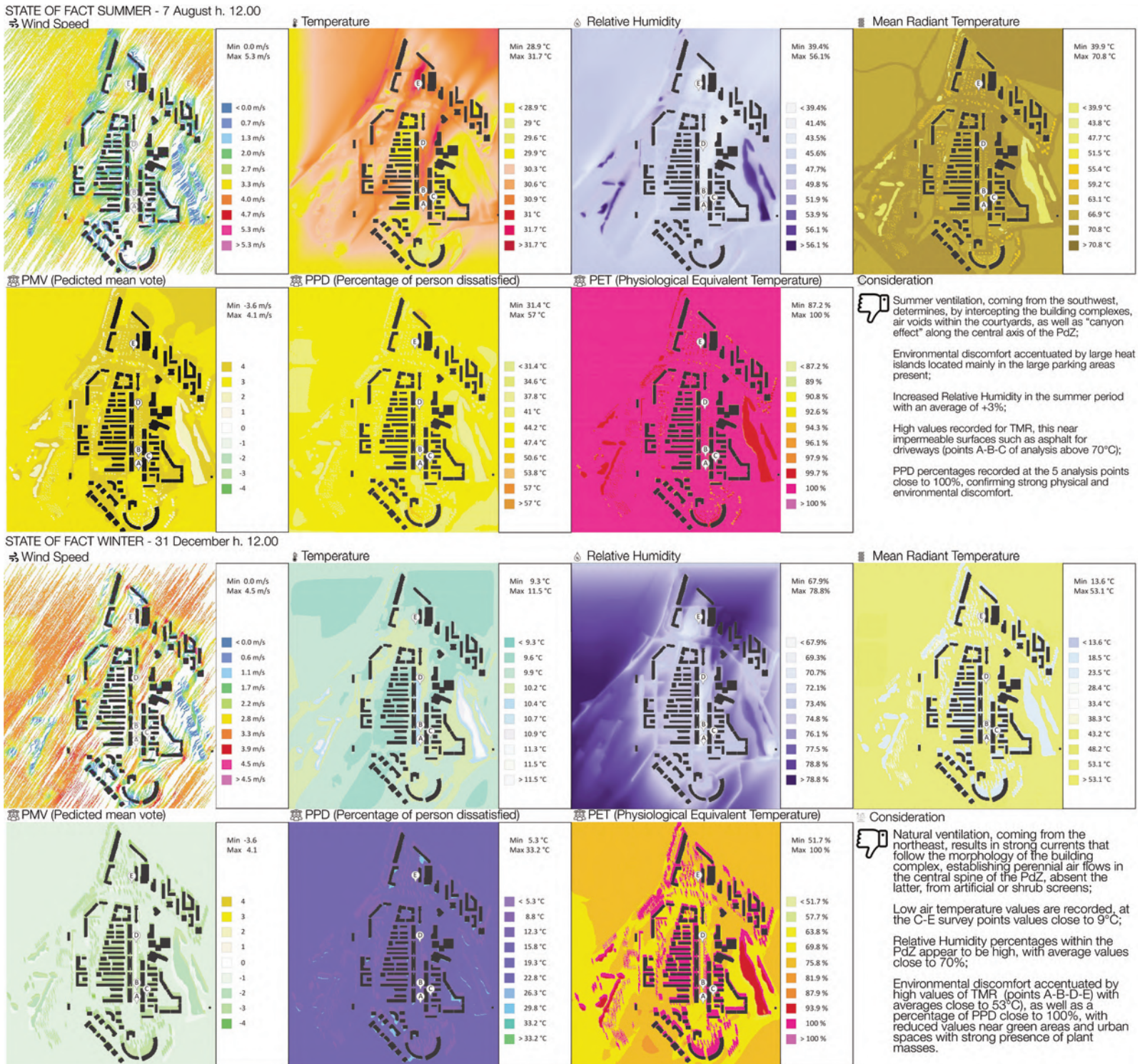


Fig. 12 | Ante operam fluid dynamics simulations of the Casal Monastero 'Piano di Zona', Rome (credit: the Authors and S. Urbinati, 2021-2022).

demanding a new, integrated and transversal approach in the entire process of programming, design, and production, fully integrated with the innovative result of the digital transition (Abdolhosseini Qomi et alii, 2016).

Investigating the existing building stock – more than 65% of which predating the first energy savings law (ISTAT, 2021) – requires responding to the commitments taken on in a European setting, aimed at reducing the emissions of greenhouse gases, derived first and foremost from energy consumption for heating and cooling, with a view to a decarbonization of the sector that can no longer be delayed (Kuittinen et alii, 2021; IEA, 2021). Continuous technological innovation has

led to the development of increasingly efficient software packages able to simulate actual behavioural characteristics more accurately. This allows, within a given 'virtual' space, a construction's environmental and energy performance in an urban district to be studied, while defining full-blown intervention scenarios (Erell, Pearlmutter and Williamson, 2011). The achievement of high performance of fluid dynamic behaviours in indoor comfort, and the very idea of sustainability included in the growing developments of the tools of Information and Communication Technology (Maksimovic, 2018), require specific, reiterated analyses with alternative technical solutions implemented during the decision-making process. These

solutions require an increasingly active role of digital technologies and a planning managed by scientific parameters (Boeri et alii, 2017).

This paper's objective, within the context of the approaches belonging to Technological and Environmental Design, is to illustrate the results of research activities aimed at defining directions and strategies for the use of passive environmental/technological systems in the regeneration of architectures and existing urban districts aided by the formulation of dynamic predictive calculation models in support of design, organized into: framework of reference data; simulations on the state of the art (ex-ante status); critical assessments of the results, obtained following the adop-

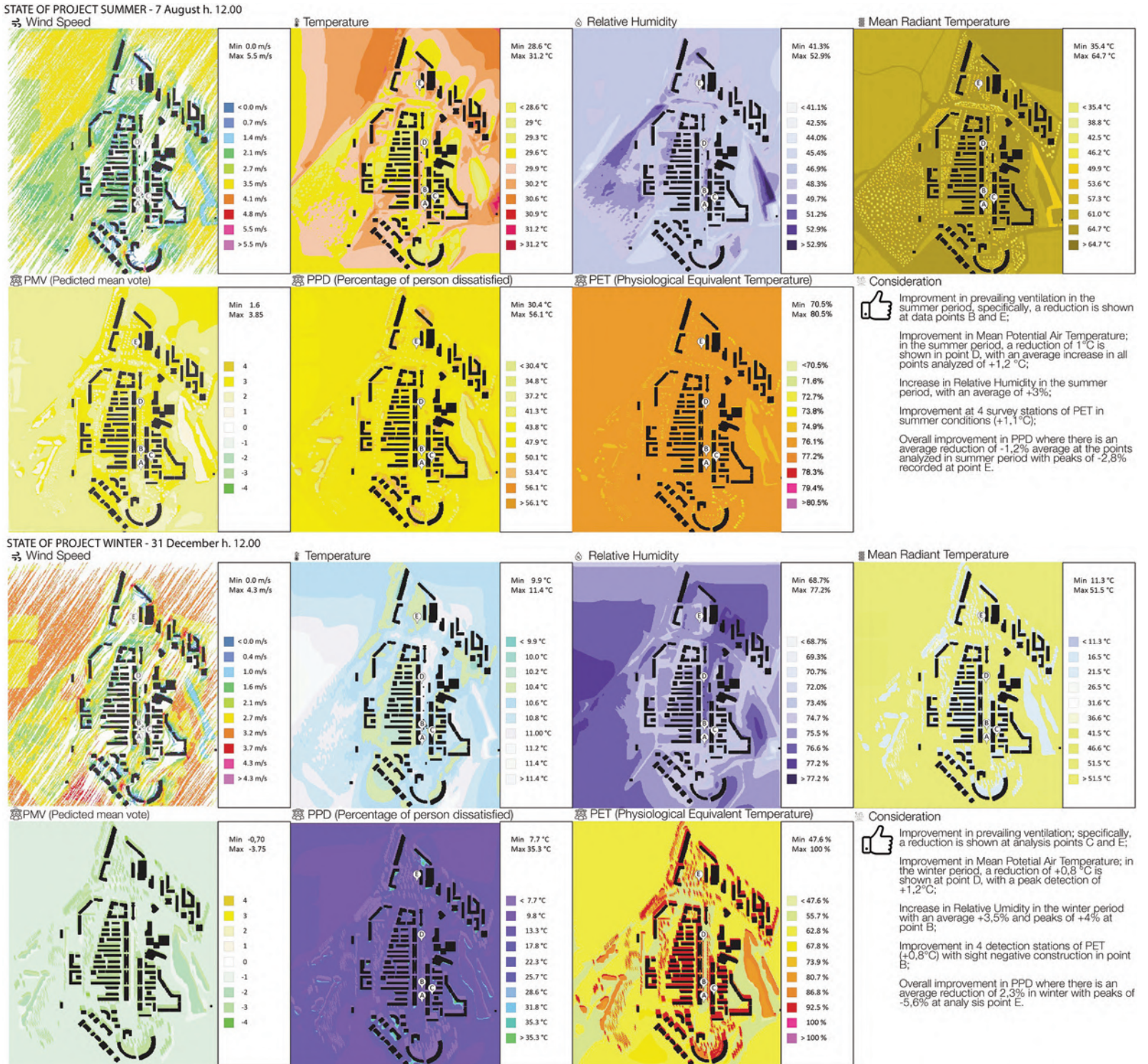


Fig. 13 | Post operam fluid dynamics simulations of the Casal Monastero 'Piano di Zona', Rome (credit: the Authors and S. Urbinati, 2021-2022).

tion of intervention scenarios and repeatedly modifying arrangements and functions so as to offer ever higher performance. These innovative models are aimed at defining solutions appropriate for the testing and verification results obtained from the dynamic simulations, while formulating adaptive intervention models that are more effective in the setting of reference and the environmental microclimate conditions (Makropoulou and Gospodini, 2016; Santamouris et alii, 2015); the effectiveness of the combination of energy efficiency strategies with those of regulating the building envelopes for external environmental factors is verified by quantifying the buildings' emissions of embodied and operational carbon (Carrada and Frizza, 2021).

Since a sustainable regeneration can be effected only after carefully assessing the performance of the built system as a whole and its carbon footprint, a clear methodology to quantify the emissions must be defined. To date, there is no quantification of the contributions towards reducing the emissions derived from mitigation of the urban microclimate, which the study instead implements in the assessment model by associating it with energy consumption thanks to ex-ante and post operam fluid dynamic simulations, put in place through the use of specific software packages allowing the obtained results to be critically quantified and discussed. The paper presents the results of the analysis of various technological so-

lutions for the urban regeneration of Rome's Vigne Nuove and Casal Monastero neighbourhoods (Fig. 1), as part of the activity provided for by the 2017 PRIN (project of overriding national interest) 'Tech Start - Key Enabling Technologies and Smart Environment in the Age of Green Economy - Convergent Innovations in the Open Space/Building Systems for Climate Mitigation', carried out by the Research Unit of 'Sapienza' University of Rome's Department of Planning, Design, Technology of Architecture, which also involved other peripheral areas of the Capital<sup>1</sup>. The urban regeneration proposals for the two study cases were geared to the ability to introduce and strengthen technological and environmental systems able to

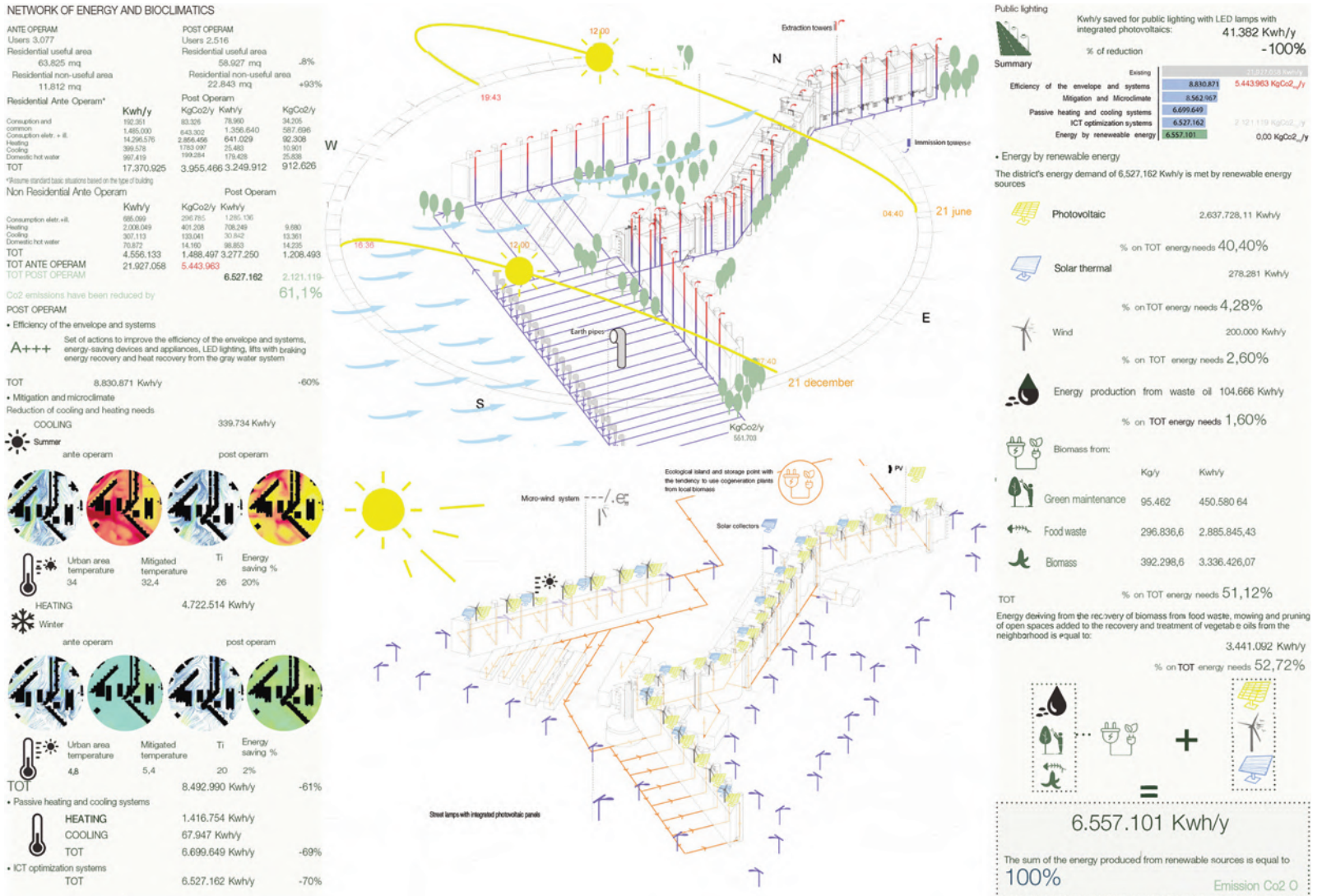


Fig. 14 | 'Energy and Bioclimatic' network with the environmental-technological solutions adopted in the Vigne Nuove 'Piano di Zona', Rome (credit: the Authors and C. Delsasso, 2021-2022).

improve the aspects of environmental comfort and sustainability through design solutions that aim to test the achieved improvements, with the primary objective of increasing the usability of public spaces and their liveability by augmenting environmental quality and well-being.

### Research methodology and operative phases

The methodological system is based on the latest scientific literature and international documents and reports on the 'input modelling-simulation-output simulation' design simulation systems, constituting a framework of reference for identifying the technological and environmental systems that are the object of scientific analysis (input modelling), defining possible intervention scenarios with the selection of the most appropriate alternative solutions depending on the obtained simulation results (simulation), and, lastly, defining an intervention model that can be adapted to the various contexts (output modelling).

The research was developed through: 1) obtaining the climate data and the main environmental factors; 2) identifying the contextual macro-areas representing the two urban districts' bioclimate behaviour; 3) defining the contextual environmental profiles (surface materials, vegetation and heights of the urban fabric), using direct ob-

servation and Google Earth and Google Street View tools; 4) ex ante modelling of the microclimate of the areas being studied, using ENVI-met software (version 5.0.3), in order to assess how different development models, including variable quantities of pavement and vegetation, influence the localized temperatures; 5) developing such environmental parameters as Air Temperature (AT; °C), Physiological Equivalent Temperature (PET; °C), Mean Radiant Temperature (MRT; °C) and Wind Speed (WS; m/s); 6) developing parameters that highlight the condition of the individual's mental and physical well-being as relates to the environment where he or she is, the Predicted Mean Vote (PMV), and the Predicted Percentage of Dissatisfied (PPD); 7) assessing and discussing the results of the parameters examined with the dynamic simulations and bioclimate-environmental assessment of the ex-ante and post operam state; 8) examining the correlation between outside air temperature and the energy consumption of the buildings, and building a concept framework of reference for the definition of the technological and environmental systems characterizing the urban regeneration intervention, while respecting the analytic, assessment, and predictive results of the expected performance; 9) predicting the variation of energy consumption due to heat-

ing and cooling, through the deviation of the outside temperature, before and after, as an effect of interventions aimed at mitigating the microclimate; 10) defining the intervention's scenario and assessing its compatibility with the preset objectives and in the development of the design experiment, with the choice of one or more solutions depending on an assessment of environmental bioclimate performance with reference to the intervention's post operam conditions; 11) plotting the general framework of CO<sub>2</sub> emissions derived from the overall built system (energy, water, waste, mobility).

### Experimentation on the case of the Vigne Nuove neighbourhood in Rome

Vigne Nuove is an urban district located in the northeastern area of Rome inside the ring road (Grande Raccordo Anulare), near the Tufello and Val Melancia quarters. Its area covers slightly more than 3 km<sup>2</sup>, 3% of the entire Municipio III municipal district (Fig. 2). The plot was built between 1973 and 1979 by the Rome public housing authority (Istituto Autonomo Case Popolari - IACP) with extraordinary GESCAL funding in 1969. The building complex, consisting of 524 dwellings for 3,300 inhabitants, occupies a triangular area covering nearly 8 ha, with a pronounced slope from east to west.

NETWORK OF ENERGY AND BIOCLIMATICS

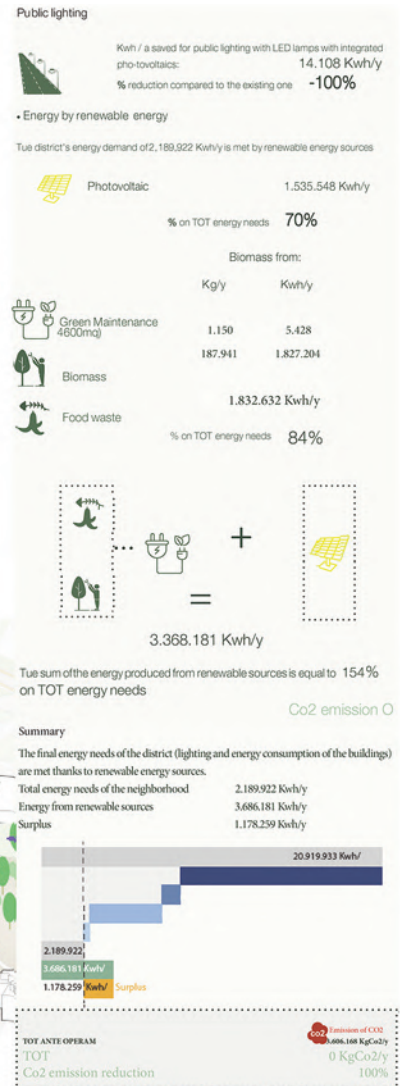
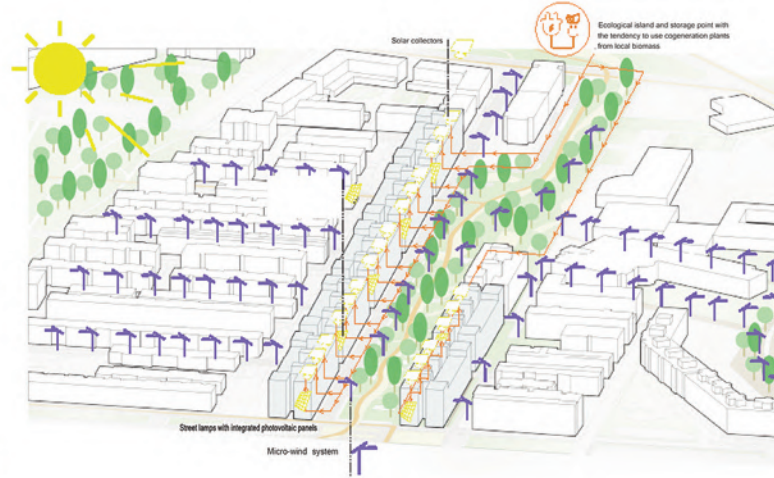
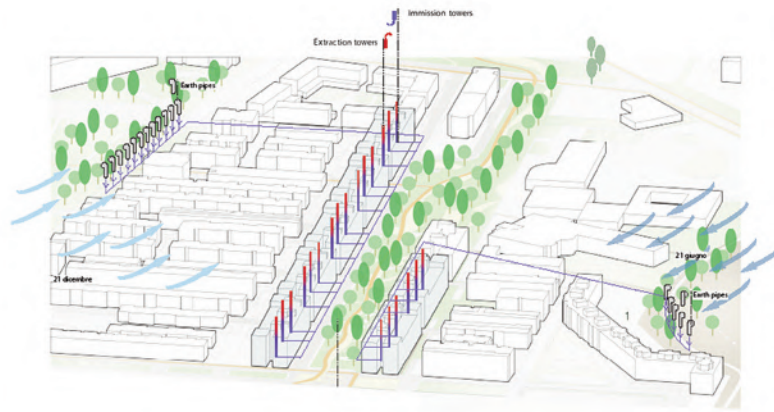
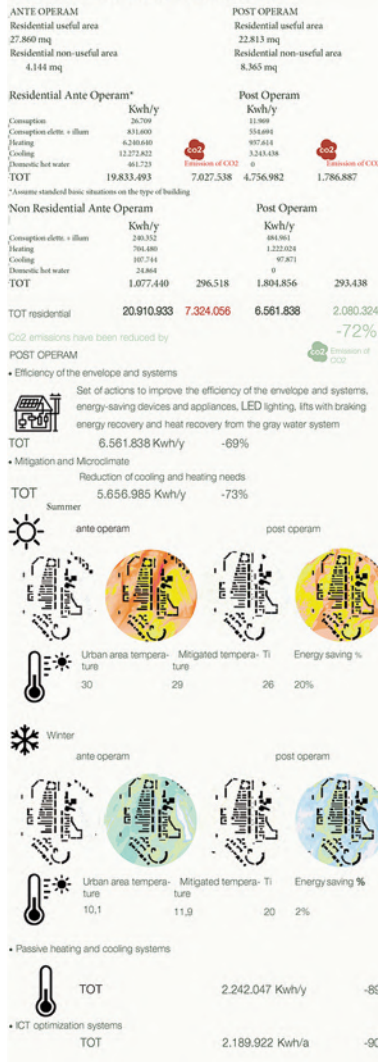


Fig. 15 | 'Energy and Bioclimatic' network with the environmental-technological solutions adopted in the Casal Monastero 'Piano di Zona', Rome (credit: the Authors and S. Urbinati, M. M. Pani, F. Nava and V. Tulelli, 2021-2022).

The area's design, in terms of layout and volume, consists of three structural elements: a road level for vehicular mobility, parking, and green areas; an elevated level, consisting of a pedestrian footway that passes over the difference in elevation of the terrain on whose sides are placed the one- or two-storey buildings housing the services and the collective equipment; and lastly, the 7-8-storey residential buildings (Fig. 3), in addition to the arcade and a garage level positioned at the margins of the plot, circumscribing the internal spaces without closing the area's perimeter, to which cylindrical towers outside of the building, containing stairways and lifts, are added. The in-line aggregation of dwellings is measured by a structural mesh articulated by the alternation of a large span, equal to approximately 7.5 metres between the axes, and a small one of about 3 metres, containing the kitchens and baths and their vertical systems in an arrangement repeated on all levels and for all types of dwelling, and determines the landmark for the views.

The neighbourhood aimed to restore the unregulated fabric of the peripheries and to constitute a pole of attraction for the presence of public and private services able to enliven community life. The area's difference in elevation, however, broke the design's linearity and generated dark

and labyrinthine spaces that contributed towards making the place unsafe; neglect, decay, and vandalism then did the rest. The open spaces present in the neighbourhood are all poorly maintained, hard to access, and difficult for the residents to use; the major road axis of Via Giovanni Conti has mainly deciduous tree and shrub species unable to shield the emissions of pollutants or to constitute a barrier against cold winter winds. The buildings are clad in panels of concrete and pink marble grit, while the open spaces are marked by concrete slabs for pedestrian paths and asphalt for sidewalks and road beds, all of which are highly degraded (Fig. 4). The socioeconomic fabric is fragile, stigmatized by high unemployment and a reduced presence of young families with children, to the point that the housing is often oversized in area. The urban district's energy consumption is currently quantified as 21,927,058 Kwh/year with carbon emissions defined at 5,443,963 KgCO<sub>2</sub>eq/year.

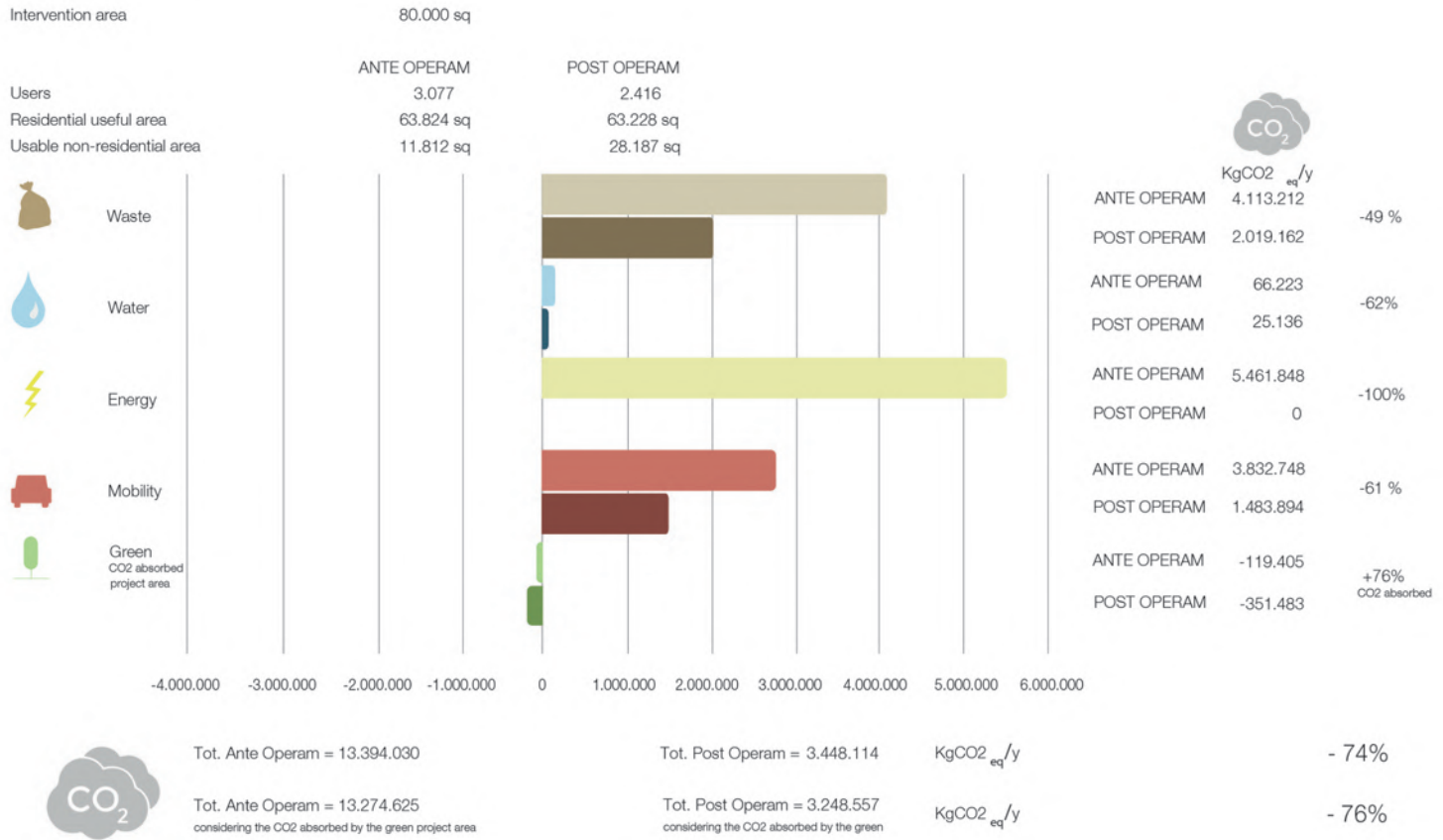
The Vigne Nuove project, therefore, calls for a bioclimatic improvement of the open spaces, in accordance with their increase and valorization through enhanced masses of trees and shrubs, autochthonous and native to the place and able to: mitigate the phenomenon of heat islands; to make a real contribution to eliminating di carbon

emissions; to promote shade; to reduce the phenomenon of run-off along the main roads. The urban regeneration design (Fig. 5) is articulated in a strengthening of sustainable mobility through increased bus lines, their replacement with reduced-length, electric vehicles (to link the neighbourhood to the nearby interchange hubs – the MB1 Jonio stop, the Nuovo Salario FL1 railway station), and the planning of bike-pedestrian paths capable of providing connections to the neighbouring areas. On the other hand, the buildings' energy retrofitting focuses on the morphological/energy/typological and technological aspects of the buildings, and of the interstitial and external spaces in which to introduce new activities to incentivize the sociality and convivial life of the inhabitants, also through such forms of sharing as community vegetable gardens.

For the purposes of measuring the environmental parameters, 4 areas have been determined, marked by the homogeneity of morphological characteristics and identified through determination of key points at the barycentre of each area, representative of the urban structure's microclimatic behaviour and marked by progressive capital letters: point A in correspondence with the roadbed of Via R. Valentino at the school complex; point B, at the centre of the areas destined

GREEN CITY AND CLIMATE MITIGATION: REGENERATION PROJECT OF THE ERP DISTRICT OF VIGNE NUOVE, ROME

Final balance of CO<sub>2</sub> emissions



GREEN CITY AND CLIMATE MITIGATION: REGENERATION PROJECT OF THE ERP DISTRICT OF CASAL MONASTERO, ROME

Final balance of CO<sub>2</sub> emissions

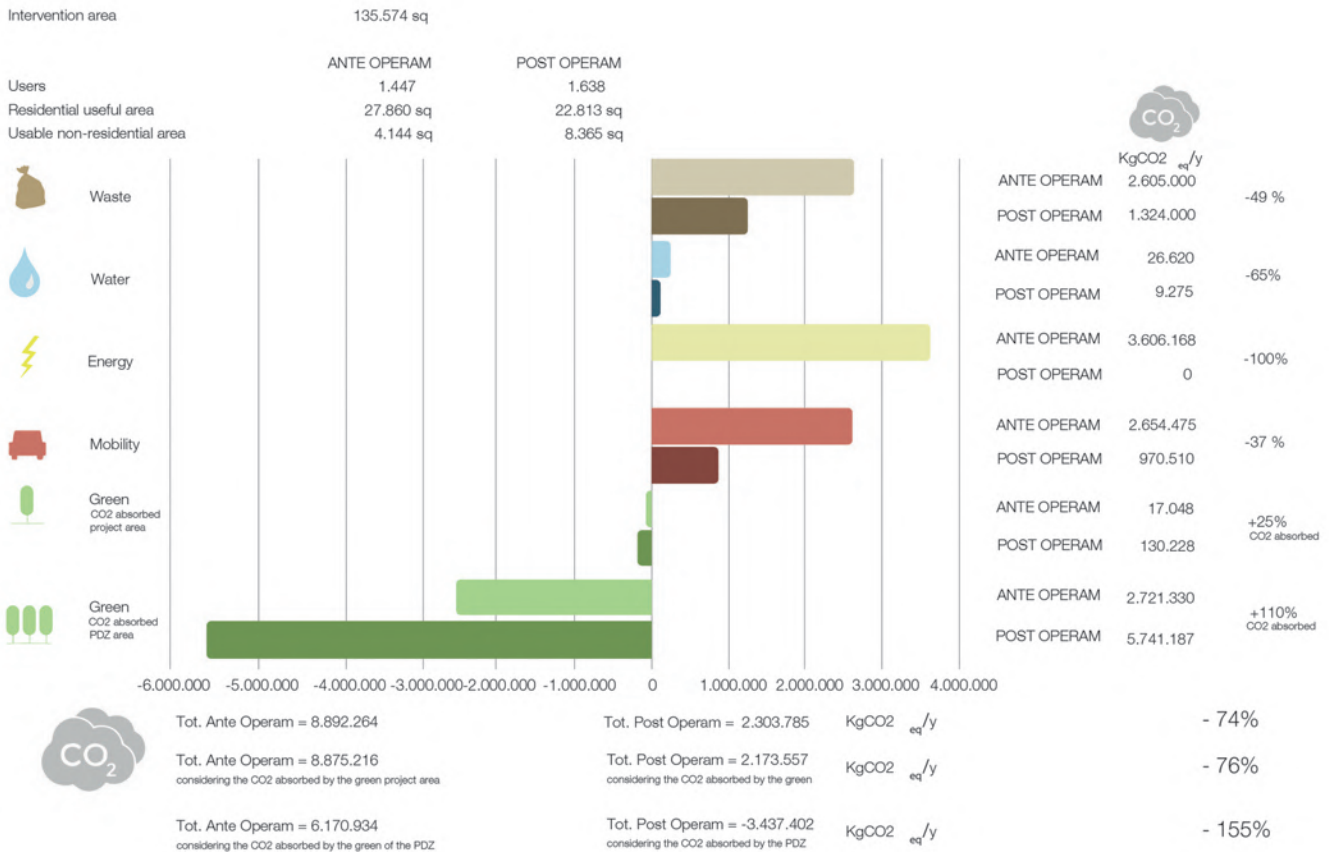


Fig. 16 | Final balance of CO<sub>2</sub> emissions with decarbonisation scenarios of the Vigne Nuove 'Piano di Zona', Rome (credit: the Authors and C. Delsasso, 2021-2022).

Fig. 17 | Final balance of CO<sub>2</sub> emissions with decarbonisation scenarios of the Casal Monastero 'Piano di Zona', Rome (credit: the Authors and S. Urbinati, 2021-2022).

PdZ Vigne Nuove	Winter Ante Operam				Summer Ante Operam			
	A	B	C	D	A	B	C	D
Detection points	A	B	C	D	A	B	C	D
Wind speed (m/s)	2.5	2	1.5	1.5	1.5	1.5	2	1.5
Temperature (°C)	9.1	9.3	9.6	9.4	33	33.8	33.6	33.2
TMR (°C)	39.1	39.8	39.1	38.4	72	64	56	68
PMV	-3	-3	-3	-4	2	3	2	4
PPD (%)	60	50	40	40	100	100	70	70
1PET	6.5	4	6	5	36.8	36.8	34.2	39.4

PdZ Vigne Nuove	Winter Post Operam				Summer Post Operam			
	A	B	C	D	A	B	C	D
Detection points	A	B	C	D	A	B	C	D
Wind speed (m/s)	1.5	1	1	1	2	1	2.5	1
Temperature (°C)	10.1	10.2	10.5	10.8	31	32	32.2	31.6
TMR (°C)	41.4	43.2	43.3	43.8	60	58	52	59
PMV	-1.5	-0.5	-2	-2.5	1	2	1	3
PPD (%)	40	10	30	35	70	70	60	50
PET	7.4	7.8	7.5	7	33.8	31.6	29	34.2

**Tabb. 1, 2** | Results of the ante and post operam winter and summer bioclimatic simulations of the Vigne Nuove 'Piano di Zona', Rome (credits: the Authors, 2022).

for the residents' parking placed between the two-row buildings; point C in correspondence with the entrance to the local health service's ASL Roma1 location; point D in the open and permeable spaces currently characterizing the neighbourhood's equipped areas (Fig. 6).

The results of the simulations performed on the project's arrangement may be summarized as follows. In the considered areas, the Air Temperature (AT) showed an average summertime decline of 1.7 °C (from 33.4 to 31.7 °C), and a one-degree increase in the winter (from 9.4 to 10.4 °C). On the other hand, in the observed areas, the Mean Radiant Temperature (MRT) showed a 7.8 °C decline in the summer and a 3.8 °C increase in the winter. The adopted technological solutions permitted a 4.6 °C reduction in summertime perceived temperature (from 36.8 to 32.2 °C) and a wintertime increase of 2 °C (from 5.4 to 7.4 °C). Natural ventilation during the summer increased by 0.5 m/s in all areas, while during the winter it is kept under better control in the exposed areas, declining by 1 m/s (in points A and B) and 0.5 m/s in the others. As regards the users' physical and mental well-being, the PMV (Predicted Mean Vote) declined on average by 1 point in the summer and 1.6 points in the winter; the percentage of 'unsatisfied' users (PPD) consequently fell on average from 85% to 62% in the summer and from 47% to 28% in the winter (Fig. 7).

**Experimentation on the case of the Casal Monastero neighbourhood in Rome** | Casal Monastero is a small neighbourhood on Rome's north-eastern periphery in the Municipio IV municipal district, outside the ring road (Grande Raccordo Anulare – GRA) and adjacent on the south to Via Tiburtina (Fig. 8). Its area covers 74 ha, or 2% of

the entire Municipio IV district. The neighbourhood was built in the late 1990s as a nucleus of homes built cooperatively and financed by the Region, in the area adjacent to Via di Sant'Alessandro. The buildings are therefore of recent construction (Fig. 9), with pilotis, and with curtain envelope for the façades, while the open spaces are characterized by slabs in concrete grit for the pedestrian paths, slabs of basalt for the sidewalks, and asphalt for the road beds (Fig. 10). Having been recently planned, the neighbourhood offers good liveability but not without a sense of abandonment and isolation due to the distance from the city centre and for the break represented by the ring road. The constructions present in the central backbone (Viale Ratto delle Sabine) do not exceed six stories in height, with the ground floor dedicated to services; the buildings are not constructed against one another, and for the most part the type is row villas with small yard.

There are various criticalities, including an inadequate level of public transportation (there are only two bus lines that pass infrequently, and the extension of Metro Line B has not been carried out); there is a dearth of spaces for social aggregation; shops are limited to those for essential goods; primary services leave much to be desired; the bike/pedestrian path to reach Torraccia as well as the ring road is merely an informal one. The urban district's energy consumption may currently be quantified as 20,910,933 Kwh/year with carbon emissions defined at 7,324,053 KgCO<sub>2</sub>eq/year.

The Casal Monastero regeneration project (Fig. 11) is defined in accordance with the conception of a boulevard as a central axis for the neighbourhood, reorganizing mobility by introducing bike/pedestrian paths and introducing electric shuttle buses able to link the now highly isolated

neighbourhood to the nearby interchange hubs (MB1 Rebibbia stop, railway stop on the Roma-Sulmona-Pesca 'Tor Sapienza' Line). The valorization of open spaces calls for their requalification and for the introduction and/or enhancement of tree and shrub species native to the place, able to improve the elimination of the urban district's carbon emissions and increase permeable surfaces through a considerable reduction of the roads that are present. The buildings' energy requalification sees a strategic in increased production of energy from renewable sources, the energy improvement of the structures that are present and of the conditions of thermohygro-metric comfort using green and brown roofs. The recovery and management of grey water and stormwater are also planned, through the strengthening of the neighbourhood's purification plant for irrigation and reuse for the dwellings' hygienic services.

For the purposes of measuring the environmental parameters, 5 areas of the district being examined have been determined as a function of the urban planning scheme, along with 5 points at their barycentre, using procedures similar to those indicated for Vigne Nuove in terms of homogeneity (the points are marked with progressive capital letters): point A in the district's south, in the open, permeable space looking out on Viale Ratto delle Sabine; point B in the intersection between the central road axis (Viale Ratto delle Sabine) and Via Monteleone Sabino, which is affected by the neighbouring Parco del Sole park; point C within the courtyard spaces characterizing the portion of public residential building; point D in the point of intersection between the central road axis, Via Camilla Virginia Savelli, and the adjacent V. Savelli equipped park; point E in the open, impermeable space situated in the district's north, destined for car parking (Fig. 12).

PdZ Casal Monastero	Winter Ante Operam					Summer Ante Operam				
	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E
Detection points	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E
Wind speed (m/s)	3	3	1.9	2.7	2.9	2.5	1.7	1.3	2.4	2.3
Temperature (°C)	10	10	9.7	10.2	9.6	30.1	30.6	29.8	30.6	31.2
Relative Umidity (%)	69	69	73	71	72	42.3	41.2	43.8	41.2	41.6
TMR (°C)	39.3	38.3	41.2	41.2	43.1	67.4	66.8	66.3	68	68.3
PMV	-1.8	-1.8	-1.9	-1.7	-2.4	4	4.1	4.1	3.9	3.8
PPD (%)	65	65	70	85	93	99.9	99.9	99.9	100	100
PET (°C)	13.4	13.4	15.6	14.8	6.6	40.5	42.8	42.8	43.3	43.8

PdZ Casal Monastero	Winter Post Operam					Summer Post Operam				
	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E
Detection points	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E
Wind speed (m/s)	2.3	2.2	1.5	2.4	2	2.4	2.8	1.8	2.7	2.9
Temperature (°C)	10.9	10.7	10.1	11	10.3	29.3	29.8	29.3	29.6	29.5
Relative Umidity (%)	73.4	73.7	74.5	74.9	73.4	43.7	43.4	47.8	44.7	46.4
TMR (°C)	44.3	45.4	46.5	46.2	47.1	61.5	63.7	63.4	63.2	53.7
PMV	-1	-1.3	-1.4	-1.5	-1.7	2.8	2.9	3	2.7	2.6
PPD (%)	59	63.7	68.9	83.2	87.4	77.1	77.4	77.5	76.8	77
PET (°C)	14.3	14.4	16.3	15.3	6.9	39.4	41.8	42.1	42.2	44.3

**Tabb. 3, 4** | Results of the ante and post operam winter and summer bioclimatic simulations of the Casal Monastero 'Piano di Zona', Rome (credits: the Authors, 2022).

The project of urban regeneration and tree planting with the function of screening and of improving microclimatic comfort enabled a 1 °C (from 30.5 to 29.5 °C) summertime decline in Air Temperature (AT) and a wintertime increase of 0.7 °C (from 9.9 to 10.6 °C). The Mean Radiant Temperature (TMR) fell from 67 to 61 °C in the summer and rose from 41 to 46 °C in the winter. The urban tree-planting practices, followed by a substantial increase of the permeable areas and enhancement of existing ones, allowed the summertime perceived temperature to decline by 1.1 °C in areas A and D, by 0.7 °C in area C, by 0.5 °C in area E, and by 0.4 °C in area B, while an average wintertime increase of 0.80 °C was recorded in every area of the analyzed district. A summertime increase in Natural Ventilation (WS) was also observed, by 1.1 m/s in point B, and from 0.1 to 0.6 m/s in the other areas, while increasing on average by 0.6 m/s in the winter. As regards the users' conditions of physical and mental well-being, the PMV declined on average by 1.2 in the summer and 0.5 in the winter; the percentage of users who were 'unsatisfied' (PPD) declined on average from 100 to 77% during the summer, and from 75 to 72% during the winter (Fig. 13).

**Discussion of the results** | For both case studies, Vigne Nuove and Casal Monastero, the experimentation highlighted the effectiveness of the proposed design solutions consisting of improving the microclimate conditions, improving the efficiency of the building envelopes through reliance

on passive technologies, and introducing energy-saving devices and LED public and private lighting systems (Figg. 14, 15) than can be summarized in a reduction in energy consumption of 70% (2,189,922 Kwh/year) for Vigne Nuove (Fig. 16) and 85% (2,121,119 Kwh/year) for Casale Monastero (Fig. 17), with carbon emissions declining respectively by 60% (2,121,119 KgCO<sub>2</sub>eq) and by 72% (2,080,324 KgCO<sub>2</sub>eq). This energy demand can be met entirely by integrated systems for the generation of energy from renewable sources, like photovoltaic, solar, and wind, mainly roof-mounted, as well as by recovering energy originating from the management of the biomass of outdoor spaces, from the organic fraction inherent to the district's waste cycle, and recovery of used vegetable oil.

**Research conclusions and future outlooks** |

This paper illustrates the results of applying multiscale and multicriteria predictive calculation models of a technological and environmental nature in architecture design, with the objective of offering responses to the challenges of adapting to and mitigating climate change, to be achieved through their replicability in other settings with similar characteristics. In this way, the aim is to give experimentation the characteristic of testing and verification in a constant evolution, in progress, of the methodological approach.

The elimination of greenhouse gases, in accordance with a scientific orientation established and confirmed by this research, requires a holistic approach able to reduce the use of fossil resources

and impacts on the environment to a minimum, the effectiveness of which is increased by careful assessment of the built system and knowledge of its behaviour in terms of performance. In this sense, reliance on simulation and modelling can support the definition of adequate responses in terms of energy and the environment. The models developed in this perspective are in fact to take on key importance in environmental planning, allowing qualitative and quantitative factors to be measured (Tabb. 1, 2). In this regard, emphasis is given to the innovative profile of the methodological approach developed as a framework of reference in support of the experimentation and design phase (through activities of input ex-ante modelling/simulation and ex-post output modelling/simulation) for the construction of design models with a multiscale approach and with a technological and environmental character. The aim is to guarantee improved environmental comfort in outdoor, in-between, and indoor spaces at the same time, with a view to adaptation to the impacts of climate change and to reducing the energy requirement, for the purposes of eliminating CO<sub>2</sub> emissions and therefore of mitigating the causes of climate change in the built environment (Tabb. 3, 4).

The global setting of the construction sector is being oriented towards energy and socio-economic transition based upon saving consumption, reducing emissions, and the complete circularity of resources, by focusing the programming of national and international policy in support of the regeneration di urban areas. The design sce-

narios proposed for the examined urban districts are emblematic of this new approach. Moreover, it is highlighted that environmental technological planning, also in the phase of experimentation on the two public housing neighbourhoods, is a key factor for enhancing the built environment, thus showing important technological solutions in the bioclimatic, energy, and thermal aspects and in solutions for controlling and optimizing the microclimate of open spaces.

Lastly, the construction of urban regeneration scenarios, supported by the results of the targeted fluid dynamic simulations, has made it possible to assess methodologies, procedures, and application tools able to properly guide the interventions along the strategic axes of technological innovation and climate adaptation. This methodology, defined in accordance with the concepts of comparability, innovativeness, and sustainability, therefore allows the issues of applicability and effectiveness of the proposed strategies in terms of repercussions on the economic and social fabric of the area subject to intervention to be investigated, with the final goal of offering solutions that are

comparable, replicable, and measurable in terms of performance and well-being.

As to the research's potential impacts, it is pointed out that the issue is of great scientific relevance in light of the European and national policies and strategies as illustrated in the NextGenerationEU Plan<sup>2</sup> and the Italian National Resilience and Recovery Plan (lit. Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza – PNRR; Repubblica Italiana, 2021). In this sense, the importance is observed of the positive impacts that may be achieved by defining a planning methodology replicable in the numerous urban districts that, on a national and European level, present similar features in the urban setting, and that will hopefully be involved in the urban regeneration processes that may be activated with the funds as per the aforementioned Plans.

In this perspective, the main research development opened by this paper relates to the progressive refinement of the models for quantifying the reduction of energy consumption by buildings, and of the related greenhouse emissions, achievable with strategies to mitigate the conditions of the urban microclimate in exterior and in-

between spaces. Lastly, an additional research perspective opened by this paper concerns the issue of the availability of data on incorporated and operational greenhouse emissions in the domestic construction sector, for the purpose of a greater reliability of input data with stronger representativity at the local level, in the performance verification and assessment models.

## Notes

1) This paper is the product of research and experimentation carried out in continuity at 'Sapienza' University of Rome, Department of Planning, Design, Technology of Architecture: PRIN (Progetto di Rilevante Interesse Nazionale – lit. Project of Overriding National Interest) research 'Tech-Start – Key Enabling Technologies and Smart Environment in the Age of Green Economy – Convergent Innovations in the Open Space/Building System for Climate Mitigation' (2019-2022), with specific reference to the research work by the 'Sapienza' University of Rome operating unit, Principal Investigator Prof. F. Tucci. The working group is composed of the following: P. Altamura, V. Cecafozzo, G. Turchetti, and M. Giampaolletti; Collaborators: F. Nava, M. M. Pani, G. Romano, V. Tullelli, C. Dalsasso, L. Giannini, I. Fabiani, G. Trifoglio, S. Urbinati and M. Vadalà. The paper's images were conceived and developed by the article's authors with the important contributions of: C. Dalsasso for Figures 2, 3, 4, 5, 6, 7, 14 and 16; S. Urbinati with processing by V. Cecafozzo and M. Giampaolletti for Figures 9, 10, 11, 12, 13, 15 and 17.

2) For information on NextGenerationEU, consult: [ec.europa.eu/info/strategy/recovery-plan-europe\\_en#next-generationeu](https://ec.europa.eu/info/strategy/recovery-plan-europe_en#next-generationeu) [Accessed 27 September 2022].

## References

Abdolhosseini Qomi, M. J., Noshadravan, A., Sobstyl, J. M., Toole, J., Ferreira, J., Pellenq, R. J.-M., Ulm, F.-J. and Gonzalez, M. C. (2016), "Data analytics for simplifying thermal efficiency planning in cities", in *Journal of the Royal Society Interface*, vol. 13, issue 2, pp. 1-10. [Online] Available at: [doi.org/10.1098/rsif.2015.0971](https://doi.org/10.1098/rsif.2015.0971) [Accessed 27 September 2022].

Battisti, A. and Santucci, D. (eds) (2020), *Activating Public Space – An Approach for Climate Change Mitigation*, Technische Universität München Verlag, München.

Boeri, A., Battisti, A., Asdrubali, F. and Sala, M. (2017), "Approccio progettuale, efficienza energetica, bioclimatica e fonti rinnovabili negli edifici, nelle città, nei territori", in Antonini, E. and Tucci, F. (eds), *Architettura, città e territorio verso la Green Economy – La costruzione del manifesto della Green Economy per l'architettura e la città del fu-*

*turo | Architecture, city and environment towards Green Economy – Building a manifesto of the Green Economy for the architecture and the city of the future*, Edizioni Ambiente, Milano, pp. 238-253.

Carrada, G. and Frizza, C. (2021), *Transizione ecologica aperta – Dove va l'ambiente italiano?*, ISPRA, Roma. [Online] Available at: [isprambiente.gov.it/files/2021/publicazioni/publicazioni-di-pregio/tea.pdf](https://isprambiente.gov.it/files/2021/publicazioni/publicazioni-di-pregio/tea.pdf) [Accessed 27 September 2022].

Erell, E., Pearlmutt, D. and Williamson, T. J. (2011), *Urban microclimate – Designing the spaces between buildings*, Earthscan, Washington.

IEA (2021), *Global Status Report for Buildings and Construction 2021 – Towards a zero-emission, efficient and resilient building and construction sector*. [Online] Available at: [globalabc.org/resources/publications/2021-global-status-report-buildings-and-construction](https://globalabc.org/resources/publications/2021-global-status-report-buildings-and-construction) [Accessed 27 September 2022].

ISTAT (2021), *Annuario Statistico Italiano 2021*. [Online] Available at: [istat.it/storage/ASI/2021/ASI\\_2021.pdf](https://istat.it/storage/ASI/2021/ASI_2021.pdf) [Accessed 27 September 2022].

Kuittinen, M., Zernicke, C., Slabik, S. and Hafner, A. (2021), "How can carbon be stored in the built environment? A review of potential options", in *Architectural science review*, pp. 1-17. [Online] Available at: [doi.org/10.1080/00038628.2021.1896471](https://doi.org/10.1080/00038628.2021.1896471) [Accessed 27 September 2022].

Makropoulou, M. and Gospodini, A. (2016), "Urban Form and Microclimatic Conditions in Urban Open Spaces at the Densely Built Centre of a Greek City", in *Journal of Sustainable Development*, vol. 9, n. 1, pp. 132-149. [Online] Available at: [doi.org/10.5539/jsd.v9n1p132](https://doi.org/10.5539/jsd.v9n1p132) [Accessed 27 September 2022].

Maksimovic, M. (2018), "Greening the Future – Green Internet of Things (G-IoT) as a Key Technological Enabler of Sustainable Development", in *Internet of Things and Big Data Analytics Toward Next-Generation Intelligence*, vol. 30, pp. 283-313. [Online] Available at: [doi.org/10.1007/978-3-319-60435-0\\_12](https://doi.org/10.1007/978-3-319-60435-0_12) [Accessed 27 September 2022].

National Oceanic and Atmospheric Administration (2022), "Carbon dioxide now more than 50% higher than pre-industrial levels", in [noaa.org](https://www.noaa.gov), 03/06/2022. [Online] Available at: [noaa.gov/news-release/carbon-dioxide-now-more-than-50-higher-than-pre-industrial-levels](https://www.noaa.gov/news-release/carbon-dioxide-now-more-than-50-higher-than-pre-industrial-levels) [Accessed 27 September 2022].

Repubblica Italiana (2021), *Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza*. [Online] Available at: [governo.it/sites/governo.it/files/PNRR.pdf](https://governo.it/sites/governo.it/files/PNRR.pdf) [Accessed 27 September 2022].

Santamouris, M., Cartalis, C., Synnefa, A. and Kolokotsa, D. (2015), "On the impact of urban heat island and global warming on the power demand and electricity consumption of buildings – A review", in *Energy and Buildings*, vol. 98, pp. 119-124. [Online] Available at: [doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.09.052](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.09.052) [Accessed 27 September 2022].

Tucci, F. (2018), *Costruire e abitare green – Approcci, strategie, sperimentazioni per una progettazione tecnologica ambientale | Green Building and Dwelling – Approaches, strategies, experimentation for an environmental technological design*, Altralinea Edizioni, Firenze.