



Agenzia nazionale per le nuove tecnologie,  
l'energia e lo sviluppo economico sostenibile



MINISTERO DELLO SVILUPPO ECONOMICO



## Ricerca di Sistema elettrico

# Analisi preliminari e raccolta dati relativi agli effetti delle tecnologie verdi sulla mitigazione dell'isola di calore urbana

Tiziana Susca, Fabio Zanghirella, Luca Colasuonno

## ANALISI PRELIMINARI E RACCOLTA DATI RELATIVI AGLI EFFETTI DELLE TECNOLOGIE VERDI SULLA MITIGAZIONE DELL'ISOLA DI CALORE URBANA

Tiziana Susca, Fabio Zanghirella, Luca Colasuonno

Dicembre 2019

### Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021 - I annualità

Obiettivo: *N. 1 - Tecnologie*

Progetto: *1.5 - Tecnologie, tecniche e materiali per l'efficienza energetica ed il risparmio di energia negli usi finali elettrici degli edifici nuovi ed esistenti*

Work package: *2 - Materiali e soluzioni innovative per ottimizzare l'isolamento dell'involucro edilizio*

Linea di attività: *LA2.6 - Analisi preliminari e raccolta dati relativi agli effetti delle tecnologie verdi sulla mitigazione dell'isola di calore urbana*

Responsabile del Progetto: Giovanni Puglisi

Responsabile del Work package: Giovanni Puglisi

## Indice

|                                                                                                                                                  |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| SOMMARIO.....                                                                                                                                    | 4  |
| 1 INTRODUZIONE .....                                                                                                                             | 5  |
| 2 DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ SVOLTE E RISULTATI.....                                                                                             | 6  |
| 2.1. TETTI VERDI .....                                                                                                                           | 6  |
| 2.2. PARETI VERDI.....                                                                                                                           | 14 |
| 2.3. ANALISI DELLE TIPOLOGIE EDILIZIE PIÙ FREQUENTI SUL TERRITORIO ITALIANO .....                                                                | 39 |
| 2.4. STRUMENTO DI CALCOLO PER LA STIMA DEGLI EFFETTI DELLA MITIGAZIONE DELL'ISOLA DI CALORE URBANA SUL CONSUMO<br>ENERGETICO DEGLI EDIFICI ..... | 43 |
| 2.5. LCA URBANO .....                                                                                                                            | 48 |
| 3 CONCLUSIONI.....                                                                                                                               | 53 |
| 4 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI .....                                                                                                                | 54 |
| ABBREVIAZIONI ED ACRONIMI .....                                                                                                                  | 60 |

## Sommario

Negli ultimi anni, tetti e pareti verdi sono stati oggetto di un crescente numero di studi perché, a seconda dell'area climatica in cui vengono applicati, possono essere una buona strategia di mitigazione dell'isola di calore urbana e possono ridurre la domanda di energia degli edifici, soprattutto durante la stagione calda.

Il lavoro svolto e descritto in questo report, indaga, in diversi climi, gli effetti dell'applicazione di tetti e pareti verdi sull'isola di calore urbana e sul consumo di energia degli edifici attraverso una revisione della letteratura pubblicata. Le meta-analisi condotte, mostrano che l'installazione di tetti verdi determina, in tutte le aree climatiche di cui si possedevano dati, una diminuzione dell'uso dell'energia per raffrescamento estivo e una diminuzione della temperatura dell'aria all'altezza dei solai di copertura (ad eccezione dell'area climatica equatoriale). Tuttavia, l'installazione puntuale dei tetti verdi non produce alcun effetto significativo sulla mitigazione dell'isola di calore all'altezza dei pedoni. È, pertanto, necessario condurre ulteriori ricerche circa l'effetto dell'installazione sistemica dei tetti verdi nelle città per verificarne l'efficacia sulla mitigazione dell'isola di calore urbana. I risultati della revisione e delle meta-analisi condotte sono stati presentati in un articolo scientifico pubblicato su una rivista internazionale (i.e., (1)). Similmente, si è visto che l'installazione di pareti verdi è in grado di ridurre la temperatura dell'aria in prossimità delle pareti. Tuttavia, il contributo di una sola parete verde rimane, nella maggior parte dei casi, poco apprezzabile. Una riduzione della temperatura dell'aria è riscontrabile in corrispondenza di interventi sistemici di installazione delle pareti verdi a scale maggiori: dall'isolato fino ad arrivare alla scala urbana.

Inoltre, nel lavoro qui sintetizzato, vengono analizzati vari strumenti per il calcolo degli effetti della mitigazione dell'isola di calore sul consumo energetico degli edifici. Tra i vari strumenti di calcolo, viene descritto nel dettaglio un foglio di calcolo co-sviluppato da ENEA che verrà utilizzato per calcolare l'impatto della mitigazione dell'isola di calore urbana sui consumi energetici degli edifici.

Come lavoro preparatorio per i futuri sviluppi della ricerca, è stata svolta un'indagine bibliografica circa le tipologie di edifici più diffuse tra il patrimonio edilizio italiano relative alle diverse aree geografiche. L'individuazione delle tipologie edilizie più diffuse servirà per determinare uno o più edifici tipo, che saranno utilizzati per calcolare gli effetti della potenziale mitigazione dell'isola di calore urbana sull'uso di energia.

Infine, è stata condotta una revisione della letteratura esistente circa l'applicazione del Life Cycle Assessment alla scala urbana. Tale revisione ha mostrato che in letteratura non esistono studi LCA applicati alla scala urbana in cui vengano incluse le interazioni tra gli edifici e il clima urbano. Pertanto, sono stati sviluppati due approcci al fine di superare questo limite. I risultati di questa fase sono stati riassunti in un articolo scientifico pubblicato su rivista internazionale (i.e., (2)).

## 1 Introduzione

Oggi circa il 54% della popolazione mondiale vive nelle città (3); entro il 2050 questa percentuale si attesterà intorno al 75% (4) comportando un aumento della superficie urbana (5). L'urbanizzazione altera il naturale bilancio energetico provocando un aumento della temperatura urbana rispetto a quella rurale, ovvero, il fenomeno dell'isola di calore urbana. Inoltre, le città sono, ad oggi, globalmente responsabili del consumo di circa il 60-80% di energia e della produzione di una pari percentuale di emissioni di biossido di carbonio (6).

Molte megalopoli come New York, Tokyo e Nuova Delhi soffrono del fenomeno isola di calore urbana che si attesta anche fino a 8-12 °C (7-9). Tuttavia, il fenomeno è sempre più visibile anche nelle città di medie dimensioni (10,11).

L'aumento della temperatura urbana, insieme ai cambiamenti climatici globali e all'intensificarsi delle ondate di calore, sta mettendo in serio pericolo la vita della popolazione urbana. Basti pensare che solo in Europa, a causa dell'ondata di calore del 2003, si sono registrati 35000 decessi e una perdita economica di oltre 13 miliardi di Euro (12).

L'isola di calore urbana è, inoltre, causa del peggioramento della qualità dell'acqua (13) e della formazione di inquinanti primari e secondari, come l'ozono (14). Inoltre, le isole di calore urbane, da sole, possono essere responsabili di un aumento della domanda di energia per raffrescamento estivo pari a circa il 23% della totale domanda energetica per un edificio tipico (15).

Nel complesso, l'isola di calore urbana non solo inasprisce gli effetti dei cambiamenti climatici globali ma li alimenta a causa del maggiore utilizzo dell'energia che le città devono fronteggiare a causa dell'aumento della temperatura estiva. È, pertanto, un imperativo intervenire sulle nostre città in modo da mitigare le isole di calore e rendere gli ambienti rurali posti più ospitali in cui venga garantito il benessere. Inoltre, in una prospettiva di più ampio respiro, come quella dei cambiamenti climatici, l'adattamento e la mitigazione del clima, anche alla scala urbana, sono temi di grande attualità su cui è doveroso fare ricerca alla luce degli impegni presi dai Paesi firmatari dell'accordo di Parigi e che vedono tali Paesi impegnarsi concretamente già dal 2020.

Le tecnologie di involucro edilizio verde, come i tetti e le pareti verdi, sono riconosciute come tecnologie in grado di ridurre l'uso di energia degli edifici e di mitigare l'isola di calore urbana in dipendenza sia dalle diverse caratteristiche delle stesse tecnologie verdi sia, soprattutto, dell'area climatica in cui queste vengono installate.

I tetti e le pareti verdi sono in grado di contribuire contemporaneamente alla diminuzione dell'uso di energia per il raffrescamento e per il riscaldamento degli edifici e di mitigare l'isola di calore urbana. Grazie a questa doppia valenza, negli ultimi anni, la comunità scientifica ha mostrato un crescente interesse nei confronti di tali tecnologie.

## 2 Descrizione delle attività svolte e risultati

Le tecnologie di involucro edilizio verde per gli edifici come i tetti e le pareti verdi sono riconosciute come tecnologie in grado di ridurre l'uso di energia degli edifici e di mitigare l'isola di calore urbana. Tuttavia, l'effetto dell'installazione di tetti e pareti verdi può sortire effetti diversi in dipendenza di diversi fattori, come:

- caratteristiche degli edifici;
- clima locale;
- struttura urbana;
- orientamento;
- tipologia di tetto o parete verde.

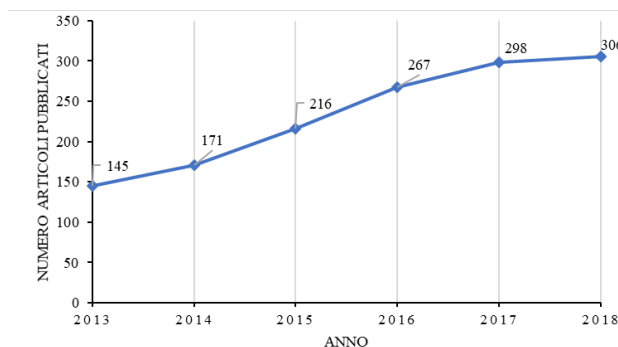
Al fine di verificare l'efficacia dei tetti e delle pareti verdi è stata condotta una revisione della letteratura scientifica.

Inoltre, è stata svolta un'indagine bibliografica circa le tipologie edilizie più comuni sul territorio Italiano. È stato selezionato uno strumento di calcolo del consumo dell'energia degli edifici per il riscaldamento invernale e per il raffrescamento estivo.

Infine, è stata condotta una revisione della letteratura scientifica pubblicata circa l'applicazione del Life Cycle Assessment (LCA) alla scala urbana.

### 2.1. Tetti Verdi

I tetti verdi sono in grado di contribuire contemporaneamente alla diminuzione dell'uso di energia per il raffrescamento e per il riscaldamento degli edifici e di mitigare l'isola di calore urbana. Grazie a questa doppia valenza, negli ultimi anni, la comunità scientifica ha mostrato un crescente interesse nei confronti di tale tecnologia. Di pari passo all'aumentare dell'interesse nei confronti dei tetti verdi, è aumentato anche il numero di pubblicazioni scientifiche. Dal 2013 alla fine del 2018 sono stati pubblicati 1403 articoli scientifici su tale tema; anno dopo anno, il numero di articoli scientifici pubblicati circa i tetti verdi è andato aumentando (Figura 1).



**Figura 1. Numero degli articoli pubblicati tra il 2013 e il 2018 circa i tetti verdi. Fonte: Grafico modificato da (1)**

Per quel che riguarda i tetti verdi, la selezione della letteratura scientifica internazionale è stata condotta su "Web of Knowledge" utilizzando come parole chiave: "green roof" e "cooling energy"; "green roof" e "building energy use". Di tutti gli articoli rispondenti alle succitate parole chiave, sono stati selezionati gli articoli pubblicati dal 2013 al 2018 che fornissero informazioni circa il comportamento termico dei tetti verdi in relazione a: isolamento, terreno di coltura, specie piantumate e contributo alla mitigazione dell'isola di calore urbana.

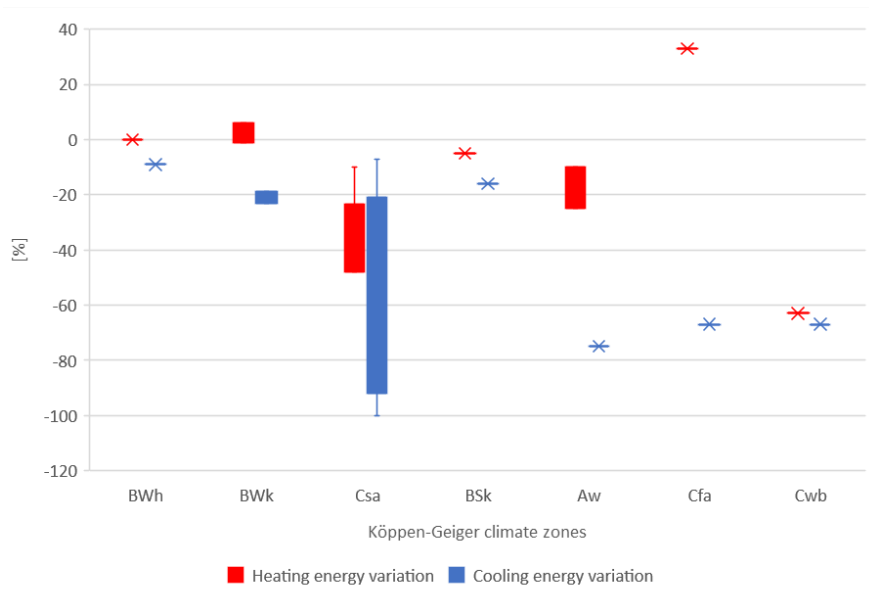
Le analisi condotte mostrano come l'isolamento termico fornito dallo strato di suolo dei tetti verdi sia cruciale nel far diminuire la domanda di energia per gli edifici nei climi freddi. Nei climi caldi e durante l'inverno, l'isolamento termico fornito dallo strato di terreno di coltura può invece essere controbilanciato

dall'evaporazione e dall'ombreggiamento fornito dalle piante. Nei climi tropicali uno strato di coltura dello spessore di quattro centimetri fornisce l'isolamento termico ideale: in corrispondenza di incrementi dello strato vegetativo, infatti, non si riscontrano benefici termici aggiuntivi. Nelle zone con clima continentale (Dwa, Dfa) e in zone con clima temperato (Cfa) lo spessore ottimale per il terreno di coltura è, invece, di 30 cm. Un altro aspetto fondamentale nella valutazione degli effetti dei tetti verdi è l'irrigazione: se non irrigati i tetti verdi forniscono infatti un contributo del tutto trascurabile o, nel peggiore dei casi, un contributo pregiudizievole nel ridurre l'uso di energia degli edifici. Al contrario, in climi piovosi, l'effetto dell'irrigazione è del tutto influente sull'uso di energia negli edifici. La revisione della letteratura scientifica ha anche mostrato che l'indice dell'area fogliare è un fattore cruciale nel ridurre l'uso di energia degli edifici in climi caldi e molto caldi; tuttavia il suo contributo risulta nullo nei giorni di maggiore nuvolosità.

È stata condotta una meta-analisi della letteratura pubblicata circa i tetti verdi differenziando il comportamento degli stessi in relazione all'area climatica in cui gli stessi vengono installati. In particolare, i casi di studio relativi alla numerosa letteratura revisionata sono stati suddivisi a seconda delle aree climatiche secondo la classificazione di Köppen-Geiger.

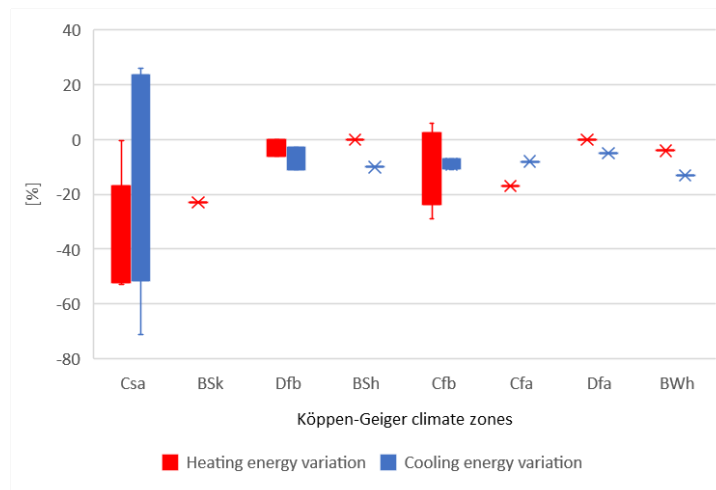
Inoltre, è stata prodotta un'analisi statistica riportante la dispersione dei dati per ogni area climatica. In particolare, sono stati individuati il primo, il secondo e il terzo quartile e la mediana dei dati per quel che riguarda la variazione percentuale di energia richiesta sia per il raffrescamento sia per il riscaldamento degli edifici a seguito dell'installazione di tetti verdi sia su solai di copertura non isolati, sia su solai di copertura isolati termicamente.

Le analisi hanno mostrato che l'installazione dei tetti verdi, in generale, contribuisce maggiormente a far diminuire la quantità di energia per il raffrescamento e per il riscaldamento degli edifici quando installati su solai di copertura non isolati termicamente (Figura 2).



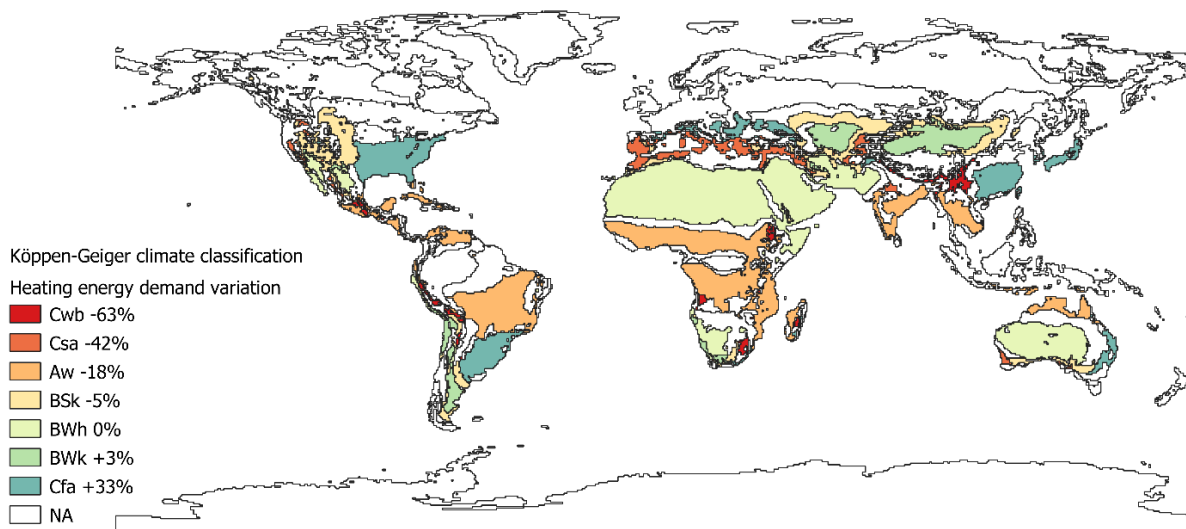
**Figura 2. Variazione della domanda di energia per riscaldamento e raffrescamento per tetti verdi installati su solai di copertura non isolati termicamente suddivisa per aree climatiche. Fonte: (1)**

Al contrario, quando installati su solai di copertura coibentati termicamente, i tetti verdi contribuiscono in minor misura a diminuire l'uso di energia degli edifici per il raffrescamento estivo e il riscaldamento invernale (Figura 3). I vari contributi sono stati differenziati per aree climatiche (Figura 3).



**Figura 3. Variazione della domanda di energia per riscaldamento e raffreddamento per tetti verdi installati su solai di copertura isolati termicamente suddivisa per aree climatiche. Fonte: (1)**

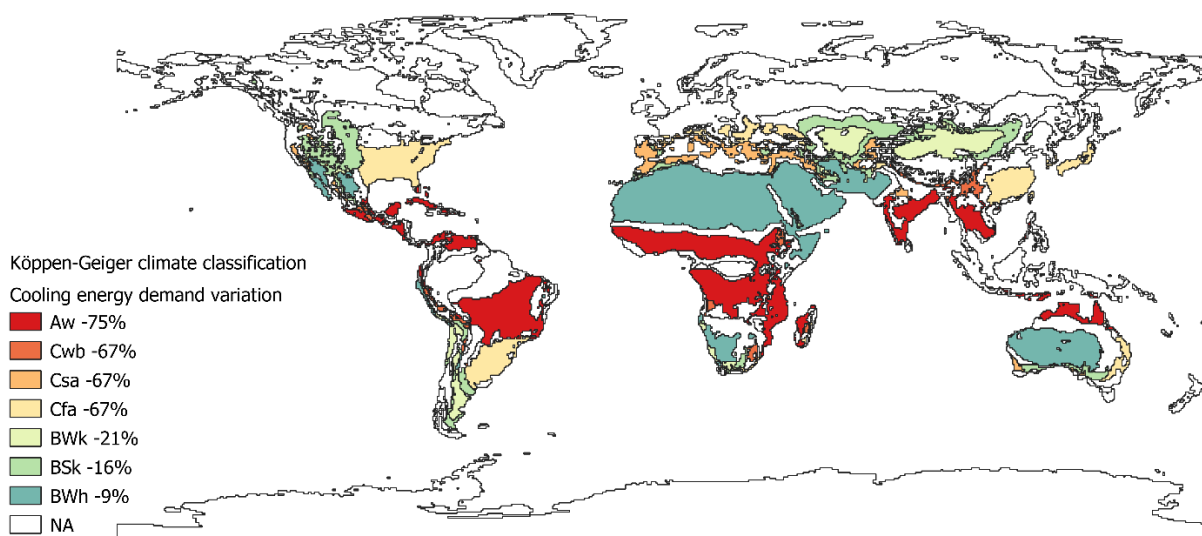
Figura 4 mostra che nella maggior parte delle aree climatiche l'installazione di tetti verdi determina una diminuzione dell'energia necessaria per il riscaldamento invernale. Tale diminuzione varia tra il 5 e il 63%. Tuttavia, si può anche notare che in aree aride desertiche calde (BWh) e in aree aride desertiche fredde (BWk) il contributo dell'installazione di tetti verdi su solai di copertura non coibentati termicamente è quasi influente, determinando, nel secondo caso un aumento dell'energia per il riscaldamento invernale pari a circa il 3%. Nel caso di aree climatiche temperate calde umide e con estati molto calde (Cfa), l'installazione di tetti verdi determina un aumento della domanda di energia per il riscaldamento durante la stagione fredda, pari a circa il 30%, risultando, pertanto, dannosa.



**Figura 4. Variazione nella domanda di energia per il riscaldamento relativa all'installazione di tetti verdi su solai di copertura non isolati termicamente. Fonte: (1)**

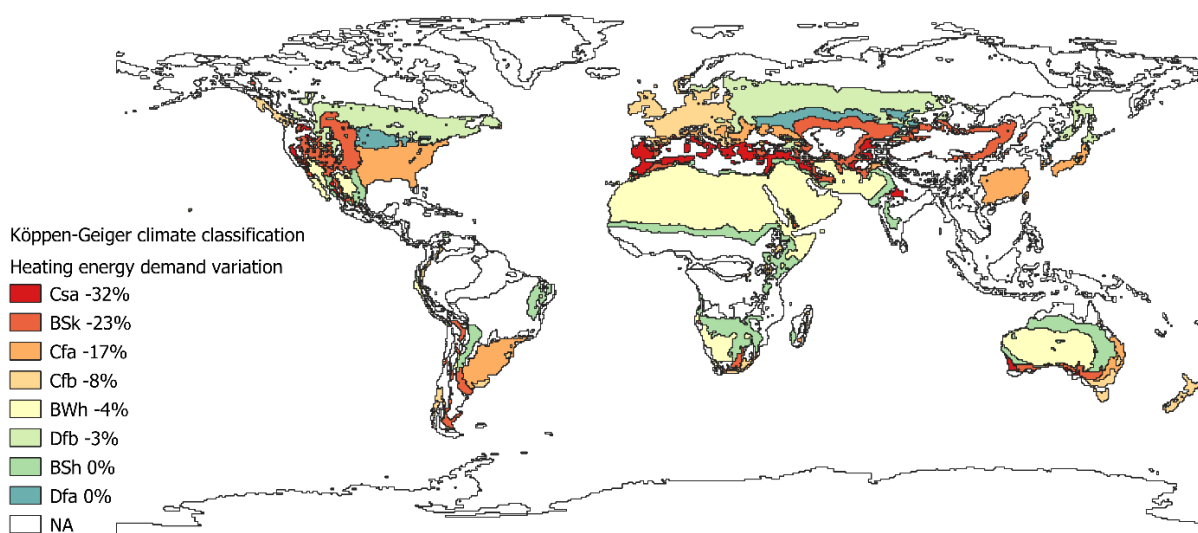
Figura 5 mostra che l'installazione di tetti verdi su solai di copertura non isolati termicamente riduce di una percentuale variabile tra il 9 e il 75%, in tutte le zone climatiche di cui si hanno dati, il consumo energetico per il raffreddamento durante la stagione calda. In particolare, le maggiori riduzioni si ottengono nella savana equatoriale con inverni secchi (Aw), in aree climatiche temperate con estati calde e umide (Cfa), in aree climatiche temperate calde con inverni secchi ed estate calde (Cwb), e in aree climatiche temperate calde con estati calde e secche (Csa), mentre nelle aree climatiche desertiche aride e calde (BWh) il decremento di energia per il raffreddamento durante la stagione calda, si attesta intorno al 9%.





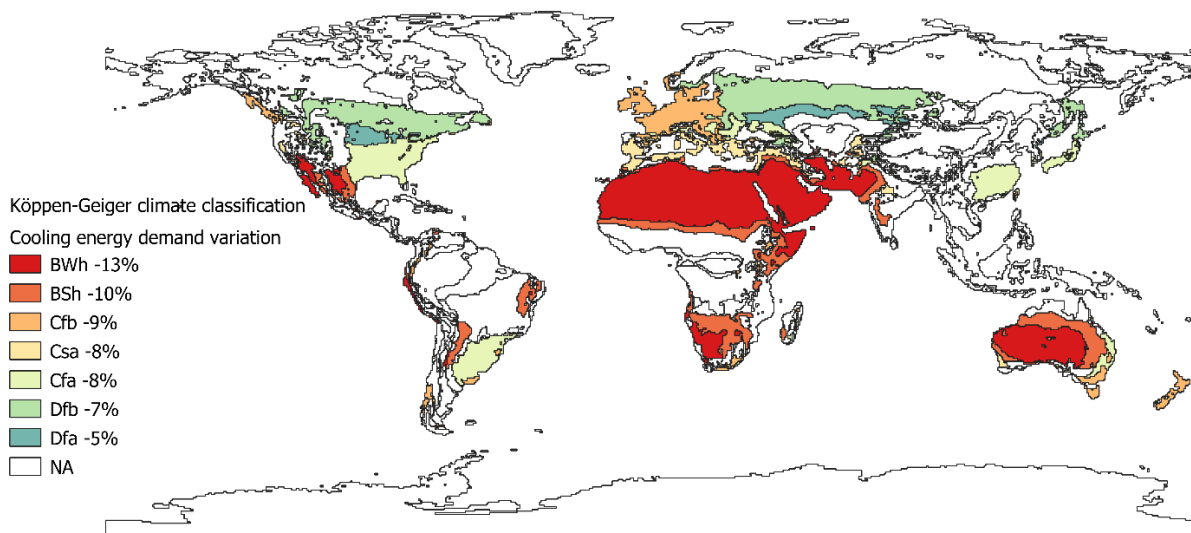
**Figura 5. Variazione nella domanda di energia per il raffrescamento relativa all'installazione di tetti verdi su solai di copertura non isolati termicamente. Fonte: (1)**

È stata revisionata anche la letteratura scientifica circa gli effetti sui consumi per riscaldamento e per il raffrescamento degli edifici a seguito dell'installazione di tetti verdi su solai di copertura isolati termicamente (Figura 6 e Figura 7).



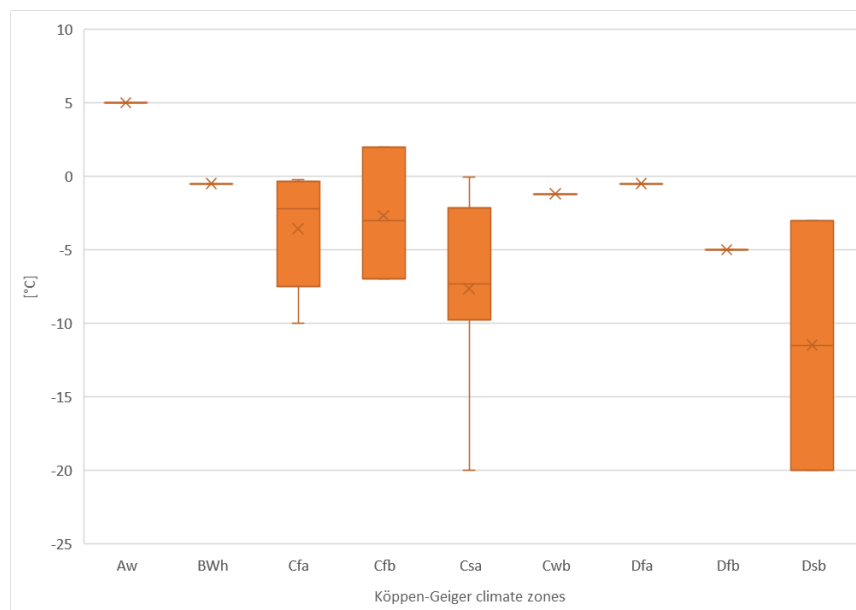
**Figura 6. Variazione nella domanda di energia per il riscaldamento relativa all'installazione di tetti verdi su solai di copertura isolati termicamente. Fonte: (1)**

L'installazione di tetti verdi su solai di copertura isolati termicamente determina una diminuzione dell'energia per riscaldamento durante la stagione fredda variabile tra lo zero e il 30% circa (Figura 6). La variazione massima si raggiunge in climi caldi e temperati con estati calde e secche (Csa), mentre non è riscontrabile nessuna variazione significativa sulla domanda di energia durante la stagione fredda in aree climatiche calde e temperate con estati calde e umide (Dfa) e in aree con un clima steppico caldo e arido (BSh) (Figura 6). Analogamente è stato indagato l'effetto che l'installazione dei tetti verdi su solai di copertura isolati termicamente ha sulla domanda di energia per il raffrescamento durante la stagione calda (Figura 7). Si è trovato che nelle aree per le quali sono disponibili i dati vi è una diminuzione dell'uso dell'energia che varia dal 5 al 13%. Le diminuzioni più significative si trovano in aree climatiche desertiche calde ed aride (BWh) (13%) e in aree con un clima steppico caldo e arido (BSh) (10%); mentre la diminuzione minore (5%) si trova in aree climatiche temperate con estati calde e umide (Dfa).

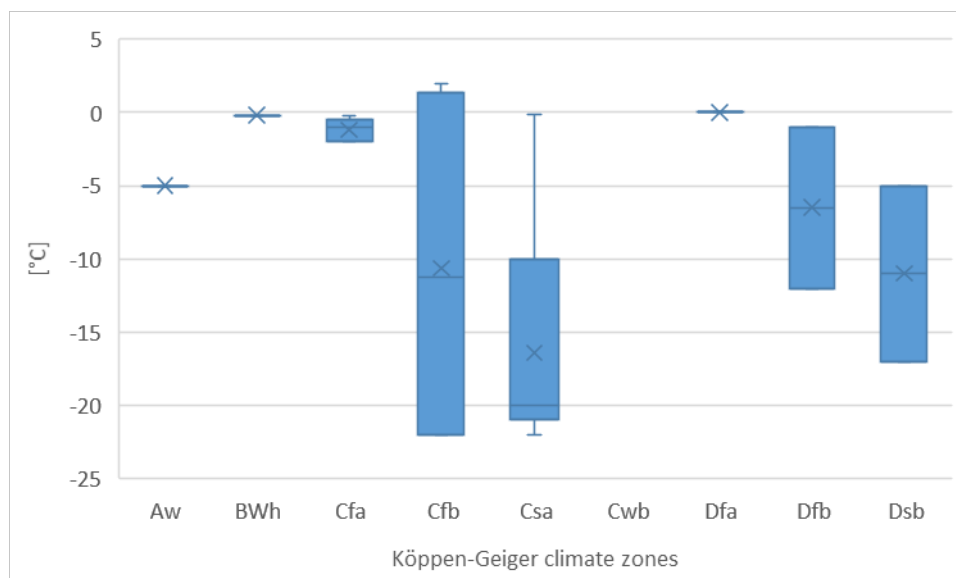


**Figura 7. Variazione nella domanda di energia per il raffrescamento relativa all'installazione di tetti verdi su solai di copertura isolati termicamente. Fonte: (1)**

Infine, è stato anche indagato il comportamento dell'installazione di tetti verdi nel mitigare l'isola di calore urbana. In dettaglio, sono state condotte due meta-analisi. La prima che riguarda gli effetti sulla temperatura all'altezza dei tetti; la seconda che riguarda gli effetti sulla temperatura dell'aria all'altezza dei pedoni, ovvero a 2 m dal suolo. Per entrambe le analisi sono stati differenziati gli effetti sulla temperatura giornaliera e notturna in dipendenza delle aree climatiche (Figura 8 e Figura 9).



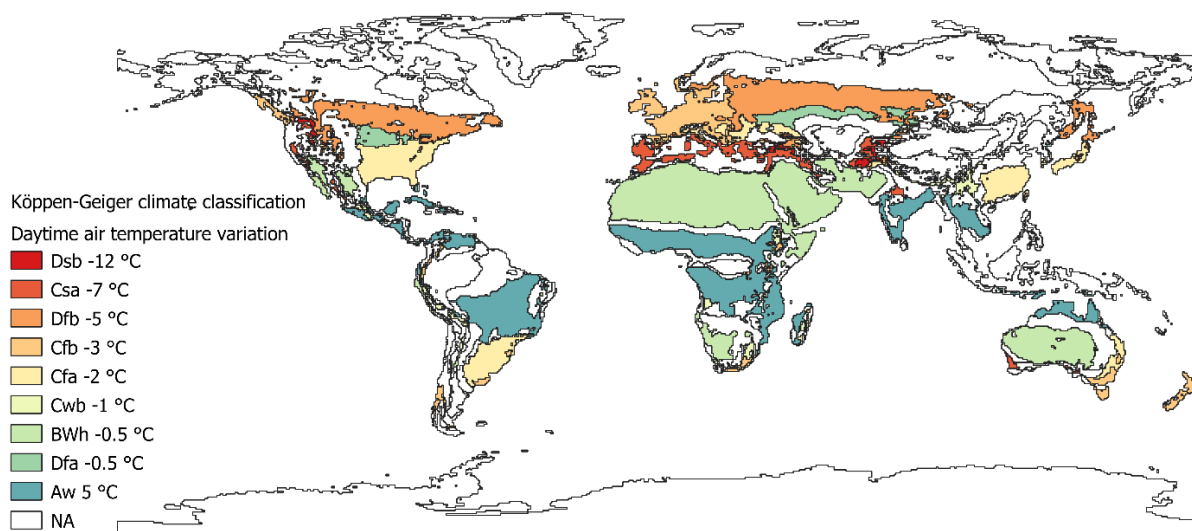
**Figura 8. Effetto dell'installazione di tetti verdi sulla temperatura diurna dell'aria all'altezza dei tetti. Fonte: (1)**



**Figura 9. Effetto dell'installazione di tetti verdi sulla temperatura notturna dell'aria all'altezza dei tetti.**  
Fonte: (1)

Figura 8 mostra che nelle aree climatiche per le quali erano disponibili dati di letteratura, l'installazione di tetti verdi provoca durante il giorno una comune diminuzione della temperatura dell'aria in tutte le aree climatiche, se pure in misura diversa a seconda dell'area, tranne che nelle zone con clima tropicale (Aw). Figura 9 mostra invece un comportamento diversificato dei tetti verdi in corrispondenza delle varie aree climatiche e un diverso effetto sulle temperature notturne all'altezza dei tetti. In particolare, la differenza della temperatura dell'aria mostra una maggiore variabilità. Tale variabilità, in alcuni casi, può essere sia negativa sia positiva, come nel caso dell'area climatica Cfb. Mentre, in tutte le altre aree climatiche analizzate, la variazione rimane negativa.

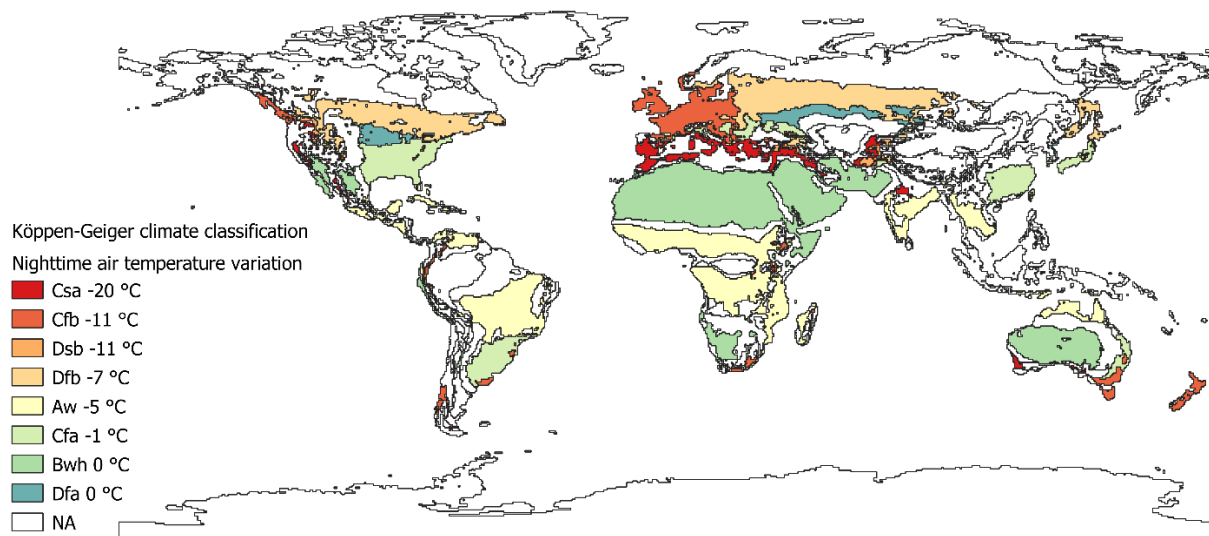
I dati mediani relativi alle variazioni di temperatura dell'aria durante il giorno e durante la notte dovuti all'installazione dei tetti verdi sono stati riportati in due mappe: Figura 10 e Figura 11.



**Figura 10. Variazione diurna della temperatura dell'aria all'altezza dei tetti.** Fonte: (1)

Figura 10 e Figura 11 mostrano che l'installazione dei tetti verdi, in generale, esercita un effetto positivo sulla temperatura dell'aria all'altezza dei tetti. Infatti, le temperature dell'aria vengono mitigate anche di 12÷20 °C in alcune zone climatiche. Invece, in altre zone climatiche, l'effetto dell'installazione dei tetti verdi ha un effetto nullo o, in alcuni casi, nocivo. Questo succede nelle aree tropicali (Aw), dove si registra un aumento della temperatura dell'aria di 5 °C durante il giorno. Mentre, durante la notte, l'effetto dei tetti verdi non

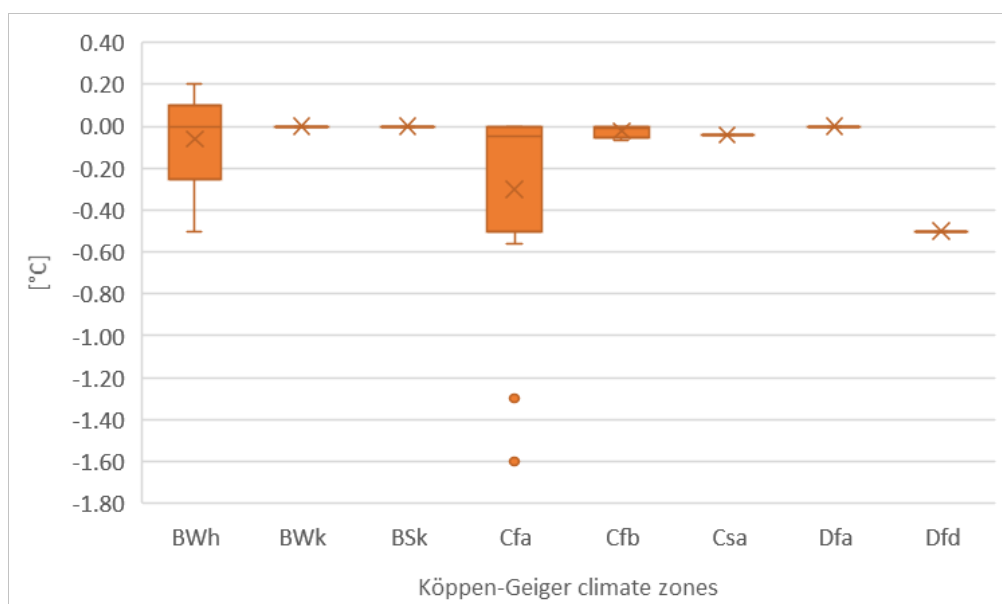
sortisce alcun tipo di effetto di mitigazione delle aree climatiche desertiche fredde (BW<sub>h</sub>) e nelle aree con clima continentale con estati molto calde (Dfa).



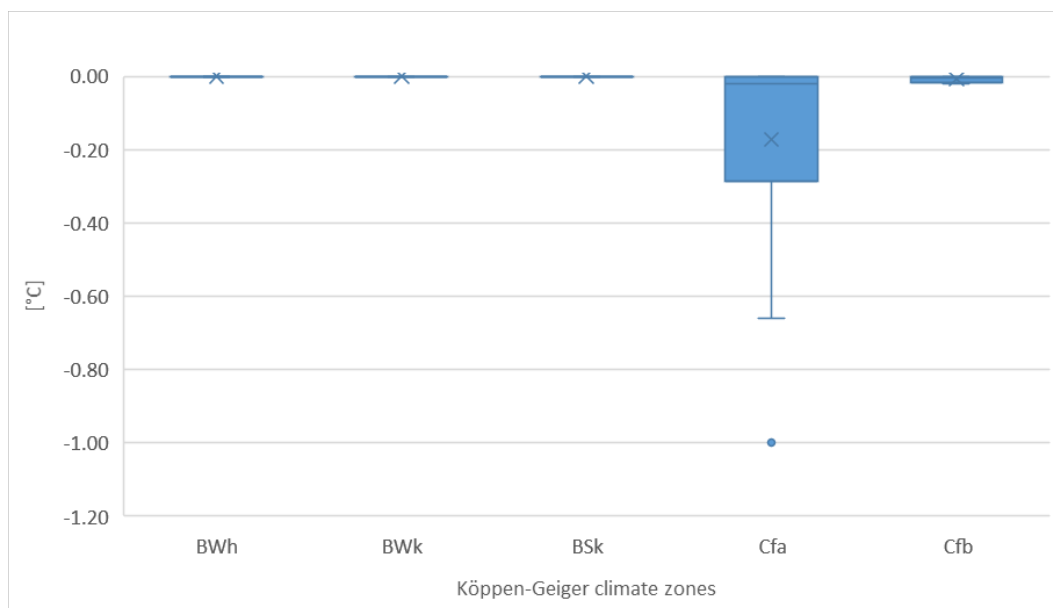
**Figura 11. Variazione notturna della temperatura dell'aria all'altezza dei tetti. Fonte: (1)**

Ne deriva che, in tutte le aree climatiche per le quali erano presenti dati di letteratura, l'installazione di tetti verdi ha un effetto di mitigazione dell'isola di calore all'altezza dei tetti, tranne che per le aree climatiche BW<sub>h</sub>, Dfa e Aw. Questo significa che l'installazione di tetti verdi, in dipendenza dall'area climatica, non solo può contribuire a ridurre la domanda energetica degli edifici, ma può anche mitigare l'isola di calore urbana all'altezza dei tetti. Di conseguenza, i tetti verdi possono fornire, all'interno di città molto stressate termicamente, aree urbane con temperature mitigate di cui i cittadini possano godere.

La mitigazione dell'isola di calore urbana deve, tuttavia, avvenire all'altezza dei pedoni (ovvero a 2 m dal suolo) in modo da essere efficace e portare giovamento all'intera popolazione urbana. La letteratura pubblicata circa gli effetti dell'installazione di tetti verdi sulla mitigazione dell'isola di calore urbana all'altezza dei pedoni è stata revisionata e i risultati delle meta-analisi sono stati riportati in Figura 12 e Figura 13.



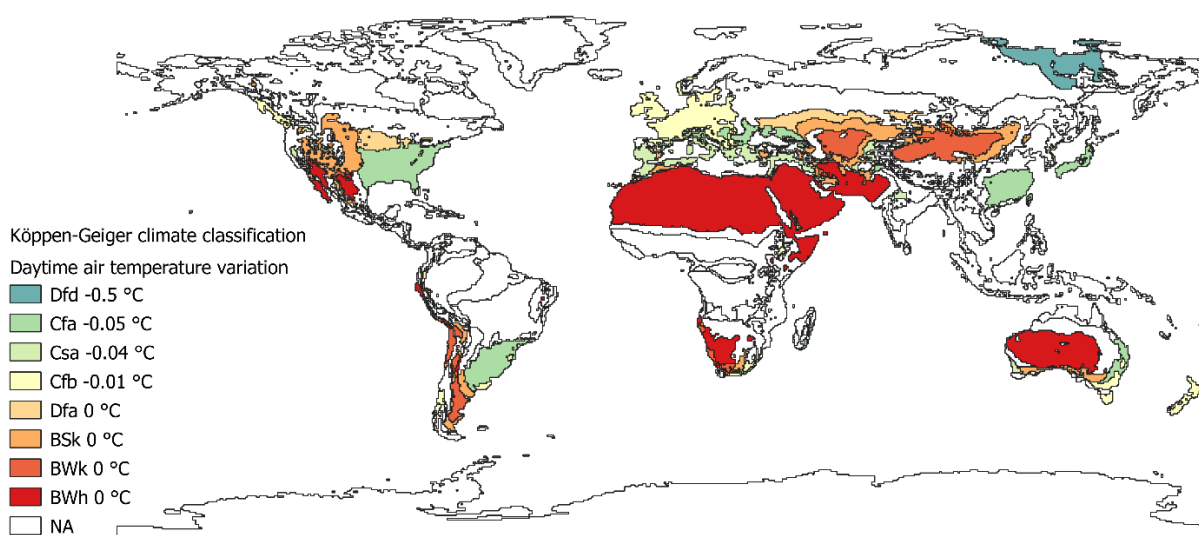
**Figura 12. Effetto dell'installazione di tetti verdi sulla temperatura diurna dell'aria all'altezza dei pedoni (2 m). Fonte: (1)**



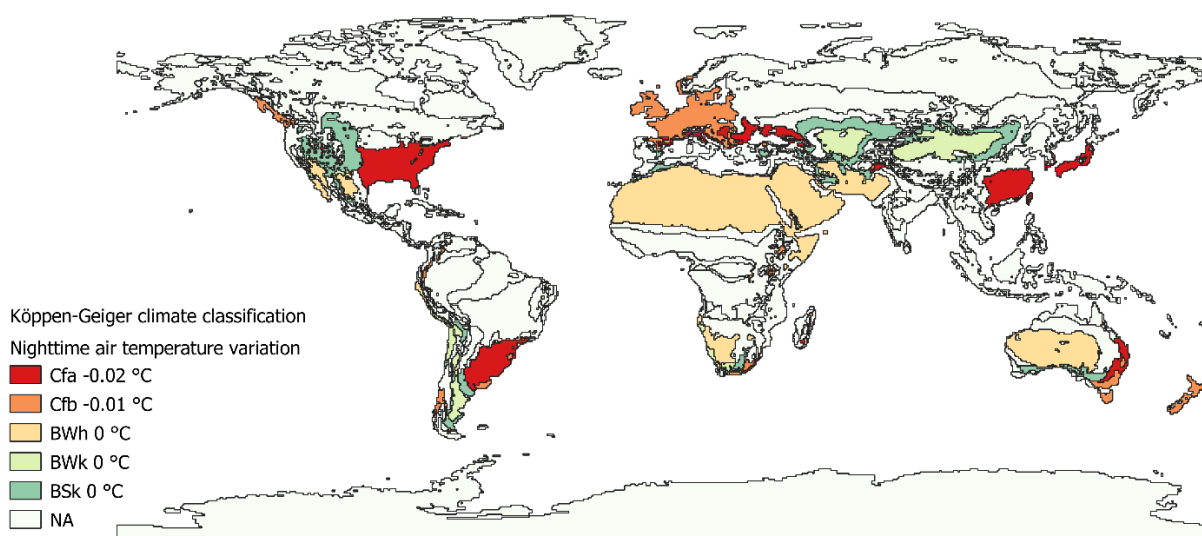
**Figura 13. Effetto dell'installazione di tetti verdi sulla temperatura notturna dell'aria all'altezza dei pedoni (2 m). Fonte: (1)**

Figura 12 e Figura 13 mostrano come nella maggior parte delle aree climatiche investigate, l'installazione di tetti verdi abbia un effetto marginale sulla mitigazione dell'isola di calore urbana, diurna e notturna, a due metri dal suolo. Tuttavia, nell'area climatica subtropicale (Cfa) i tetti verdi possono ridurre l'isola di calore urbana di 0.5 °C, mentre nelle aree desertiche con estati calde (BWh), l'installazione di tetti verdi può determinare un aumento della temperatura urbana all'altezza dei pedoni durante il giorno (Figura 12) fino a 0.2 °C. Invece, Figura 13 mostra che durante la notte, l'installazione di tetti verdi ha un effetto nullo sull'isola di calore urbana in tutte le aree climatiche investigate, tranne che nei climi sub-tropicali umidi (Cfa), dove può ridurre la temperatura fino a 0.7 °C.

I valori mediani relativi alla variazione di temperatura a due metri dal suolo dovuta all'installazione di tetti verdi sugli edifici in diverse aree climatiche sono stati riportati in Figura 14 e in Figura 15.



**Figura 14. Variazione diurna della temperatura dell'aria all'altezza dei pedoni (due metri dal suolo). Fonte: (1)**



**Figura 15. Variazione notturna della temperatura dell'aria all'altezza dei pedoni (due metri dal suolo). Fonte: (1)**

Figura 14 e Figura 15 mostrano come l'installazione di tetti verdi non abbia un effetto di mitigazione dell'isola di calore urbana al livello pedonale né durante le ore diurne, né durante le ore notturne. Solo nelle aree climatiche subartiche boreali con inverni freddi (Dfd) il decremento della temperatura urbana raggiunge il mezzo grado centigrado durante le ore diurne.

Tuttavia, è d'obbligo precisare che i risultati sopra riportati potrebbero essere influenzati dal fatto che molti tra gli studi revisionati facciano riferimento all'effetto dell'installazione di tetti verdi su di un singolo edificio piuttosto che ad una installazione sistemica a livello urbano. Pertanto, in quest'ultimo caso, i risultati potrebbero risultare più incoraggianti. Considerando che tuttavia, i risultati presentati potrebbero rappresentare lo scenario peggiore, al fine di poter efficacemente mitigare l'isola di calore urbana, l'installazione di tetti verdi dovrebbe essere affiancata da altre misure di mitigazione.

Lo studio condotto potrebbe essere ulteriormente espanso in futuro includendo le aree climatiche rimaste inesplorate. Tuttavia, i risultati forniti da questo studio possono fornire un supporto per architetti, decisori urbani e pianificatori per sviluppare regolamenti urbani che abbiano il fine di dare priorità ad interventi che contemporaneamente riducano la domanda energetica degli edifici e mitighino l'isola di calore urbana.

## 2.2. Pareti verdi

Le pareti verdi sono classificabili in due macro-categorie: living wall e facciate verdi. Le facciate verdi si distinguono dai living wall in quanto per le prime il substrato di coltura è posto in orizzontale e le piante crescono in verticale; mentre, per i secondi, lo strato di coltura è posto a ridosso della parete stessa e le piante crescono in verticale. Mentre le facciate verdi sono sistemi tecnologici di involucro edilizio che possono essere considerati "appartenenti alla tradizione", i living wall sono sistemi verdi moderni.

Gli effetti dell'installazione delle pareti verdi sia sulla mitigazione dell'isola di calore urbana sia sugli usi energetici per riscaldamento e raffrescamento degli edifici sono stati ampiamente studiati soprattutto perché, rispetto ai tetti verdi, le superfici fornite dalle murature esterne degli edifici sono generalmente più estese rispetto a quelle fornite dai solai di copertura. Pertanto, in città compatte, in cui la superficie disponibile da migliorare al fine di mitigare l'isola di calore è molto limitata, le pareti verdi possono rappresentare una possibile soluzione.

Gli effetti delle pareti verdi sull'uso dell'energia degli edifici e sull'isola di calore urbana dipende da numerosi fattori, quali: l'orientamento, l'area climatica, la stagione, le essenze vegetali e la densità fogliare.

Nel presente progetto si è revisionata la letteratura internazionale pubblicata su riviste scientifiche circa le pareti verdi e il loro effetto sia sulla domanda degli edifici sull'energia per il raffrescamento, sia sugli effetti sull'isola di calore urbana. Gli articoli scientifici revisionati sono stati selezionati cercando in Web of

Knowledge la letteratura pubblicata dal 2014 al 2019 rispondente contemporaneamente alle seguenti parole chiave: “green façade” e “cooling energy”; “green wall” e “cooling energy”; “living wall” e “cooling energy”; “green façade” e “urban heat island”; “green wall” e “urban heat island”; “living wall” e “urban heat island”; “green façade” e “UHI”; “living wall” e “UHI”; “green façade” e “UHI”. In tutto sono stati trovati 420 articoli rispondenti alle succitate parole chiave. Dei 420 articoli sono stati scartati gli articoli di revisioni e quelli pubblicati su riviste nazionali. Da tale scrematura sono risultati 12 articoli adatti alla revisione che facessero riferimento agli effetti dell’installazione di pareti verdi sulla domanda di energia di raffrescamento degli edifici e 15 articoli che riportassero gli effetti delle pareti verdi sull’isola di calore urbana.

#### Effetto sull’energia di raffrescamento

Dagli articoli revisionati riguardanti l’effetto delle pareti verdi sulla domanda di energia di raffrescamento degli edifici, sono stati estratti 69 casi di studio che sono stati suddivisi in gruppi omogenei in base all’area climatica a cui lo studio fa riferimento. I dati estratti sono sintetizzati in Tabella 1.

**Tabella 1. Revisione della letteratura pubblicata. Effetto dell'installazione delle pareti verdi sulla domanda di energia di raffrescamento degli edifici**

| Reference | Green façade typology | Kind of study | City         | Climate zone (16) | Green façade orientation | Climate conditions    | Notes                                                                                                                                                            |
|-----------|-----------------------|---------------|--------------|-------------------|--------------------------|-----------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| (17)      | Csb                   | Living wall   | Experimental | Genoa (Italy)     | South                    | Entire cooling season | Wall transmittance: 0.44 W/m <sup>2</sup> K - Plant species: 20 different plant species, both climbing plants and shrubs                                         |
| (18)      | Bwh                   | Living wall   | Simulation   | Phoenix (USA)     | Entire building          | Entire cooling season | Building: Medium Office - Wall U value: 1.31 W/m <sup>2</sup> K - Plant layer: Height: 0.2 m Leaf area index: 2.5 Leaf reflectivity: 0.22 Leaf emissivity: 0.95  |
| (18)      | Bwh                   | Living wall   | Simulation   | Phoenix (USA)     | Entire building          | Entire cooling season | Building: Primary School - Wall U value: 1.31 W/m <sup>2</sup> K - Plant layer: Height: 0.2 m Leaf area index: 2.5 Leaf reflectivity: 0.22 Leaf emissivity: 0.95 |
| (18)      | Bwh                   | Living wall   | Simulation   | Phoenix (USA)     | Entire building          | Entire cooling season | Building: Hospital - Wall U value: 1.31 W/m <sup>2</sup> K - Plant layer: Height: 0.2 m Leaf area index: 2.5 Leaf reflectivity: 0.22 Leaf emissivity: 0.95       |
| (18)      | Am                    | Living wall   | Simulation   | Miami (USA)       | Entire building          | Entire cooling season | Building: Medium Office - Wall U value: 1.31 W/m <sup>2</sup> K - Plant layer: Height: 0.2 m Leaf area index: 2.5 Leaf reflectivity: 0.22 Leaf emissivity: 0.95  |
| (18)      | Am                    | Living wall   | Simulation   | Miami (USA)       | Entire building          | Entire cooling season | Building: Primary School - Wall U value: 1.31 W/m <sup>2</sup> K - Plant layer: Height: 0.2 m Leaf area index: 2.5 Leaf reflectivity: 0.22 Leaf emissivity: 0.95 |
| (18)      | Am                    | Living wall   | Simulation   | Miami (USA)       | Entire building          | Entire cooling season | Building: Hospital - Wall U value: 1.31 W/m <sup>2</sup> K - Plant layer: Height: 0.2 m Leaf area index: 2.5 Leaf reflectivity: 0.22 Leaf emissivity: 0.95       |
| (18)      | Dfa                   | Living wall   | Simulation   | Chicago (USA)     | Entire building          | Entire cooling season | Building: Medium Office - Wall U value: 0.89 W/m <sup>2</sup> K - Plant layer: Height: 0.2 m Leaf area index: 2.5 Leaf reflectivity: 0.22 Leaf emissivity: 0.95  |
| (18)      | Dfa                   | Living wall   | Simulation   | Chicago (USA)     | Entire building          | Entire cooling season | Building: Primary School - Wall U value: 0.89 W/m <sup>2</sup> K - Plant layer: Height: 0.2 m Leaf area index: 2.5 Leaf reflectivity: 0.22 Leaf emissivity: 0.95 |
| (18)      | Dfa                   | Living wall   | Simulation   | Chicago (USA)     | Entire building          | Entire cooling season | Building: Hospital - Wall U value: 0.89 W/m <sup>2</sup> K - Plant layer: Height: 0.2 m Leaf area index: 2.5 Leaf reflectivity: 0.22 Leaf emissivity: 0.95       |



|      |     |             |            |                   |                 |                       |                                                                                                                                                                  |
|------|-----|-------------|------------|-------------------|-----------------|-----------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| (18) | Csb | Living wall | Simulation | Los Angeles (USA) | Entire building | Entire cooling season | Building: Medium Office - Wall U value: 1.31 W/m <sup>2</sup> K - Plant layer: Height: 0.2 m Leaf area index: 2.5 Leaf reflectivity: 0.22 Leaf emissivity: 0.95  |
| (18) | Csb | Living wall | Simulation | Los Angeles (USA) | Entire building | Entire cooling season | Building: Primary School - Wall U value: 1.31 W/m <sup>2</sup> K - Plant layer: Height: 0.2 m Leaf area index: 2.5 Leaf reflectivity: 0.22 Leaf emissivity: 0.95 |
| (18) | Csb | Living wall | Simulation | Los Angeles (USA) | Entire building | Entire cooling season | Building: Hospital - Wall U value: 1.31 W/m <sup>2</sup> K - Plant layer: Height: 0.2 m Leaf area index: 2.5 Leaf reflectivity: 0.22 Leaf emissivity: 0.95       |
| (18) | Bwh | Living wall | Simulation | Phoenix (USA)     | South           | Entire cooling season | Building: Medium Office - Wall U value: 1.31 W/m <sup>2</sup> K - Plant layer: Height: 0.2 m Leaf area index: 2.5 Leaf reflectivity: 0.22 Leaf emissivity: 0.95  |
| (18) | Bwh | Living wall | Simulation | Phoenix (USA)     | South           | Entire cooling season | Building: Primary School - Wall U value: 1.31 W/m <sup>2</sup> K - Plant layer: Height: 0.2 m Leaf area index: 2.5 Leaf reflectivity: 0.22 Leaf emissivity: 0.95 |
| (18) | Bwh | Living wall | Simulation | Phoenix (USA)     | South           | Entire cooling season | Building: Hospital - Wall U value: 1.31 W/m <sup>2</sup> K - Plant layer: Height: 0.2 m Leaf area index: 2.5 Leaf reflectivity: 0.22 Leaf emissivity: 0.95       |
| (18) | Am  | Living wall | Simulation | Miami (USA)       | South           | Entire cooling season | Building: Medium Office - Wall U value: 1.31 W/m <sup>2</sup> K - Plant layer: Height: 0.2 m Leaf area index: 2.5 Leaf reflectivity: 0.22 Leaf emissivity: 0.95  |
| (18) | Am  | Living wall | Simulation | Miami (USA)       | South           | Entire cooling season | Building: Primary School - Wall U value: 1.31 W/m <sup>2</sup> K - Plant layer: Height: 0.2 m Leaf area index: 2.5 Leaf reflectivity: 0.22 Leaf emissivity: 0.95 |
| (18) | Am  | Living wall | Simulation | Miami (USA)       | South           | Entire cooling season | Building: Hospital - Wall U value: 1.31 W/m <sup>2</sup> K - Plant layer: Height: 0.2 m Leaf area index: 2.5 Leaf reflectivity: 0.22 Leaf emissivity: 0.95       |
| (18) | Dfa | Living wall | Simulation | Chicago (USA)     | South           | Entire cooling season | Building: Medium Office - Wall U value: 0.89 W/m <sup>2</sup> K - Plant layer: Height: 0.2 m Leaf area index: 2.5 Leaf reflectivity: 0.22 Leaf emissivity: 0.95  |
| (18) | Dfa | Living wall | Simulation | Chicago (USA)     | South           | Entire cooling season | Building: Primary School - Wall U value: 0.89 W/m <sup>2</sup> K - Plant layer: Height: 0.2 m Leaf area index: 2.5 Leaf reflectivity: 0.22 Leaf emissivity: 0.95 |
| (18) | Dfa | Living wall | Simulation | Chicago (USA)     | South           | Entire cooling season | Building: Hospital - Wall U value: 0.89 W/m <sup>2</sup> K - Plant layer: Height: 0.2 m Leaf area index: 2.5 Leaf reflectivity: 0.22 Leaf emissivity: 0.95       |

|      |     |             |            |               |         |       |                       |                                                                                                                                                                  |
|------|-----|-------------|------------|---------------|---------|-------|-----------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| (18) | Csb | Living wall | Simulation | Los (USA)     | Angeles | South | Entire cooling season | Building: Medium Office - Wall U value: 1.31 W/m <sup>2</sup> K - Plant layer: Height: 0.2 m Leaf area index: 2.5 Leaf reflectivity: 0.22 Leaf emissivity: 0.95  |
| (18) | Csb | Living wall | Simulation | Los (USA)     | Angeles | South | Entire cooling season | Building: Primary School - Wall U value: 1.31 W/m <sup>2</sup> K - Plant layer: Height: 0.2 m Leaf area index: 2.5 Leaf reflectivity: 0.22 Leaf emissivity: 0.95 |
| (18) | Csb | Living wall | Simulation | Los (USA)     | Angeles | South | Entire cooling season | Building: Hospital - Wall U value: 1.31 W/m <sup>2</sup> K - Plant layer: Height: 0.2 m Leaf area index: 2.5 Leaf reflectivity: 0.22 Leaf emissivity: 0.95       |
| (18) | Bwh | Living wall | Simulation | Phoenix (USA) |         | West  | Entire cooling season | Building: Medium Office - Wall U value: 1.31 W/m <sup>2</sup> K - Plant layer: Height: 0.2 m Leaf area index: 2.5 Leaf reflectivity: 0.22 Leaf emissivity: 0.95  |
| (18) | Bwh | Living wall | Simulation | Phoenix (USA) |         | West  | Entire cooling season | Building: Primary School - Wall U value: 1.31 W/m <sup>2</sup> K - Plant layer: Height: 0.2 m Leaf area index: 2.5 Leaf reflectivity: 0.22 Leaf emissivity: 0.95 |
| (18) | Bwh | Living wall | Simulation | Phoenix (USA) |         | West  | Entire cooling season | Building: Hospital - Wall U value: 1.31 W/m <sup>2</sup> K - Plant layer: Height: 0.2 m Leaf area index: 2.5 Leaf reflectivity: 0.22 Leaf emissivity: 0.95       |
| (18) | Am  | Living wall | Simulation | Miami (USA)   |         | West  | Entire cooling season | Building: Medium Office - Wall U value: 1.31 W/m <sup>2</sup> K - Plant layer: Height: 0.2 m Leaf area index: 2.5 Leaf reflectivity: 0.22 Leaf emissivity: 0.95  |
| (18) | Am  | Living wall | Simulation | Miami (USA)   |         | West  | Entire cooling season | Building: Primary School - Wall U value: 1.31 W/m <sup>2</sup> K - Plant layer: Height: 0.2 m Leaf area index: 2.5 Leaf reflectivity: 0.22 Leaf emissivity: 0.95 |
| (18) | Am  | Living wall | Simulation | Miami (USA)   |         | West  | Entire cooling season | Building: Hospital - Wall U value: 1.31 W/m <sup>2</sup> K - Plant layer: Height: 0.2 m Leaf area index: 2.5 Leaf reflectivity: 0.22 Leaf emissivity: 0.95       |
| (18) | Dfa | Living wall | Simulation | Chicago (USA) |         | West  | Entire cooling season | Building: Medium Office - Wall U value: 0.89 W/m <sup>2</sup> K - Plant layer: Height: 0.2 m Leaf area index: 2.5 Leaf reflectivity: 0.22 Leaf emissivity: 0.95  |
| (18) | Dfa | Living wall | Simulation | Chicago (USA) |         | West  | Entire cooling season | Building: Primary School - Wall U value: 0.89 W/m <sup>2</sup> K - Plant layer: Height: 0.2 m Leaf area index: 2.5 Leaf reflectivity: 0.22 Leaf emissivity: 0.95 |
| (18) | Dfa | Living wall | Simulation | Chicago (USA) |         | West  | Entire cooling season | Building: Hospital - Wall U value: 0.89 W/m <sup>2</sup> K - Plant layer: Height: 0.2 m Leaf                                                                     |

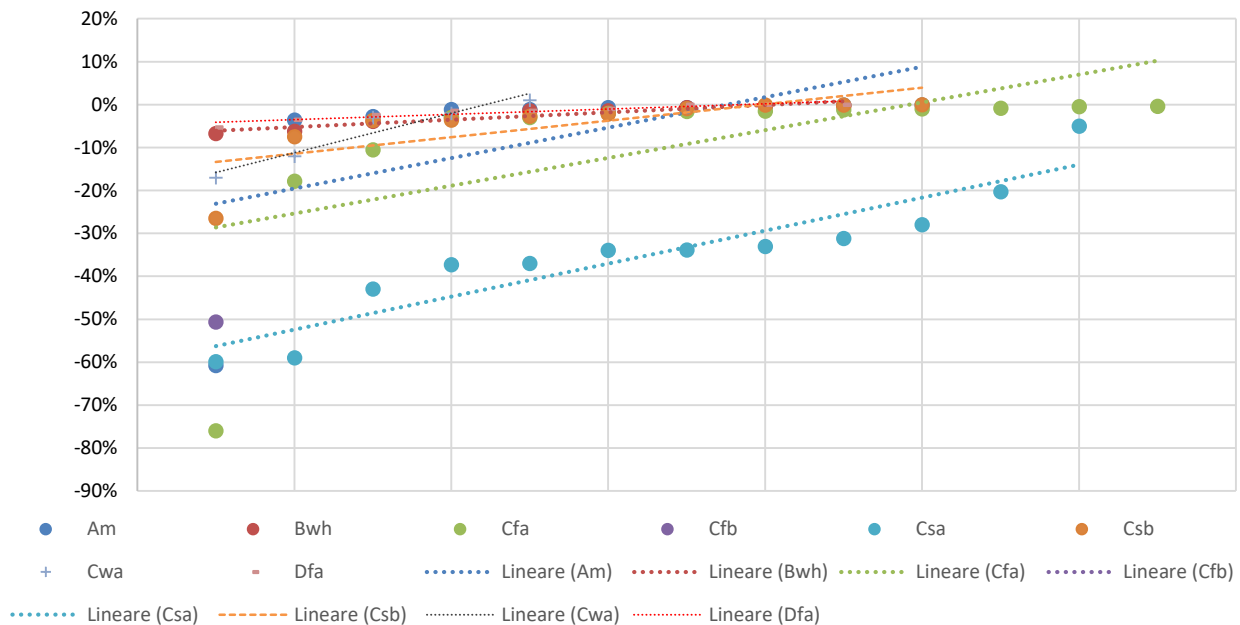
|      |     |              |              |                      |         |                      |                              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
|------|-----|--------------|--------------|----------------------|---------|----------------------|------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|      |     |              |              |                      |         |                      |                              | area index: 2.5 Leaf reflectivity: 0.22 Leaf emissivity: 0.95                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| (18) | Csb | Living wall  | Simulation   | Los (USA)            | Angeles | West                 | Entire cooling season        | Building: Medium Office - Wall U value: 1.31 W/m <sup>2</sup> K - Plant layer: Height: 0.2 m Leaf area index: 2.5 Leaf reflectivity: 0.22 Leaf emissivity: 0.95                                                                                                                                                                                                                                      |
| (18) | Csb | Living wall  | Simulation   | Los (USA)            | Angeles | West                 | Entire cooling season        | Building: Primary School - Wall U value: 1.31 W/m <sup>2</sup> K - Plant layer: Height: 0.2 m Leaf area index: 2.5 Leaf reflectivity: 0.22 Leaf emissivity: 0.95                                                                                                                                                                                                                                     |
| (18) | Csb | Living wall  | Simulation   | Los (USA)            | Angeles | West                 | Entire cooling season        | Building: Hospital - Wall U value: 1.31 W/m <sup>2</sup> K - Plant layer: Height: 0.2 m Leaf area index: 2.5 Leaf reflectivity: 0.22 Leaf emissivity: 0.95                                                                                                                                                                                                                                           |
| (19) | Cfa | Green façade | Simulation   | Hong Kong            |         | Entire building      | Summer conditions            | U value external concrete wall (Uwall): 0.74 W/m <sup>2</sup> K - Plant type: Divided Creeper (family of Parthenocissus) - Solar transmittance of the DSGF: 0.2                                                                                                                                                                                                                                      |
| (20) | Am  | Green façade | Experimental | Semarang (Indonesia) |         | Entire test facility | Summer conditions. Over 24 h | Wall U value: 0.31 W/m <sup>2</sup> K - Leaves Densities 50%                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| (21) | Cfa | Living wall  | Simulation   | Belgrade (Serbia)    |         | Entire building      | Summer conditions (July)     | Modular vegetation module: 10 cm wide, containing 8 cm of glass wool - Modular vegetation module measured U value U = 0.667 W/m <sup>2</sup> K - Existing façade U = 0.776 W/m <sup>2</sup> K                                                                                                                                                                                                        |
| (21) | Cfa | Living wall  | Simulation   | Belgrade (Serbia)    |         | Entire building      | Summer (August) conditions   | Modular vegetation module: 10 cm wide, containing 8 cm of glass wool - Modular vegetation module measured U value U = 0.667 W/m <sup>2</sup> K - Existing façade U = 0.776 W/m <sup>2</sup> K                                                                                                                                                                                                        |
| (22) | Cwa | Living wall  | Simulation   | Daejeon (Korea)      |         | North                | Entire cooling season        | Building U values - Wall <1.8 W/m <sup>2</sup> K Ground floor <0.47 W/m <sup>2</sup> K Rooftop <0.40 W/m <sup>2</sup> K Windows (double glazing) <2.0 W/m <sup>2</sup> K - Plant type: H. helix LAI: (May = 3.66, July = 2.78, October = 4.29, and February = 3.72) Height of plants = 0.2 m Leaf emissivity = 0.95 Leaf absorptivity = 0.78 Minimum stomatal resistance = 180 s/m Soil layer: 80 mm |
| (22) | Cwa | Living wall  | Simulation   | Daejeon (Korea)      |         | South                | Entire cooling season        | Building U values - Wall <1.8 W/m <sup>2</sup> K Ground floor <0.47 W/m <sup>2</sup> K Rooftop <0.40 W/m <sup>2</sup> K Windows (double glazing) <2.0 W/m <sup>2</sup> K - Plant type: H. helix LAI: (May = 3.66, July = 2.78, October = 4.29, and February = 3.72) Height of plants = 0.2 m Leaf emissivity = 0.95 Leaf absorptivity =                                                              |

|      |     |             |            |                      |                 |                       |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
|------|-----|-------------|------------|----------------------|-----------------|-----------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|      |     |             |            |                      |                 |                       | 0.78 Minimum stomatal resistance = 180 s/m Soil layer: 80 mm                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| (22) | Cwa | Living wall | Simulation | Daejeon (Korea)      | East            | Entire cooling season | Building U values - Wall <1.8 W/m <sup>2</sup> K<br>Ground floor <0.47 W/m <sup>2</sup> K Rooftop <0.40 W/m <sup>2</sup> K Windows (double glazing) <2.0 W/m <sup>2</sup> K - Plant type: H. helix LAI: (May = 3.66, July = 2.78, October = 4.29, and February = 3.72) Height of plants = 0.2 m Leaf emissivity = 0.95 Leaf absorptivity = 0.78 Minimum stomatal resistance = 180 s/m Soil layer: 80 mm |
| (22) | Cwa | Living wall | Simulation | Daejeon (Korea)      | West            | Entire cooling season | Building U values - Wall <1.8 W/m <sup>2</sup> K<br>Ground floor <0.47 W/m <sup>2</sup> K Rooftop <0.40 W/m <sup>2</sup> K Windows (double glazing) <2.0 W/m <sup>2</sup> K - Plant type: H. helix LAI: (May = 3.66, July = 2.78, October = 4.29, and February = 3.72) Height of plants = 0.2 m Leaf emissivity = 0.95 Leaf absorptivity = 0.78 Minimum stomatal resistance = 180 s/m Soil layer: 80 mm |
| (22) | Cwa | Living wall | Simulation | Daejeon (Korea)      | Entire Building | Entire cooling season | Building U values - Wall <1.8 W/m <sup>2</sup> K<br>Ground floor <0.47 W/m <sup>2</sup> K Rooftop <0.40 W/m <sup>2</sup> K Windows (double glazing) <2.0 W/m <sup>2</sup> K - Plant type: H. helix LAI: (May = 3.66, July = 2.78, October = 4.29, and February = 3.72) Height of plants = 0.2 m Leaf emissivity = 0.95 Leaf absorptivity = 0.78 Minimum stomatal resistance = 180 s/m Soil layer: 80 mm |
| (23) | Csa | Living wall | Simulation | Athens (Greece)      | East and West   | Entire cooling season | Walls: 20 cm cinderblock - Street canyon ratio height/width: 0 - Green wall substrate depth: 12 cm Vegetation coverage ratio: 1 LAI: 4                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| (23) | Csa | Living wall | Simulation | Athens (Greece)      | East and West   | Entire cooling season | Walls: 20 cm cinderblock - Street canyon ratio height/width: 0.5 - Green wall substrate depth: 12 cm Vegetation coverage ratio: 1 LAI: 4                                                                                                                                                                                                                                                                |
| (23) | Csa | Living wall | Simulation | Athens (Greece)      | East and West   | Entire cooling season | Walls: 20 cm cinderblock - Street canyon ratio height/width: 1 - Green wall substrate depth: 12 cm Vegetation coverage ratio: 1 LAI: 4                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| (24) | Csa | Living wall | Simulation | Athens (Greece)      | East and West   | Entire cooling season | Walls: 20 cm cinderblock - Green wall substrate depth: 12 cm Vegetation coverage ratio: 1 LAI: 4                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| (24) | Cfb | Living wall | Simulation | La Rochelle (France) | East and West   | Entire cooling season | Walls: 20 cm cinderblock - Green wall substrate depth: 12 cm Vegetation coverage ratio: 1 LAI: 4                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |

|      |     |              |                                      |                                    |                         |                   |                               |                                                                                                                                                                                                 |
|------|-----|--------------|--------------------------------------|------------------------------------|-------------------------|-------------------|-------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| (25) | Cfa | Living wall  | Simulation (experimental validation) | Hong Kong                          |                         |                   | Hot summer day                | Vertical greening 8.22 m <sup>2</sup> (flat surface: 7.03 m <sup>2</sup> ) – Plant type: <i>Peperomia claviformis</i>                                                                           |
| (25) | Cfa | Living wall  | Simulation (experimental validation) | Wuhan (China)                      | West                    |                   | Hot summer day                | 25 vegetation boxes and light growth medium, 500 mm in square and 10 mm in depth, July 25, 2012                                                                                                 |
| (26) | Csa | Green façade | Experimental                         | Puigverd Lleida, Catalonia (Spain) | de                      | South, East, West | June 2015, 10 days            | GF: metal trellis of 2 mm, air chamber of 25 cm - Plant type: <i>Boston Ivy</i> “ <i>Parthenocissus tricuspidata</i> ”, Set point 18°C, 10 days analyzed                                        |
| (26) | Csa | Living wall  | Experimental                         | Puigverd Lleida, Catalonia (Spain) | de                      | South, East, West | June 2015, 10 days            | Substrate: 8 cm of coconut fibre - 24 small plants each pot Plant types: <i>Rosmarinus officinalis</i> and <i>Helichrysum thianschanicum</i> ) - set point 18°C                                 |
| (26) | Csa | Green façade | Experimental                         | Puigverd Lleida, Catalonia (Spain) | de                      | South, East, West | June 2015, 11 days            | GF: metal trellis of 2 mm, air chamber of 25 cm - Plant types: <i>Boston Ivy</i> “ <i>Parthenocissus tricuspidata</i> ”, Set point 21 °C                                                        |
| (26) | Csa | Living wall  | Experimental                         | Puigverd Lleida, Catalonia (Spain) | de                      | South, East, West | June 2015, 12 days            | Substrate: 8 cm of coconut fibre - 24 small plants each pot Plant types: <i>Rosmarinus officinalis</i> and <i>Helichrysum thianschanicum</i> ) - June 2015 - Set point 21 °C - 11 days analysed |
| (26) | Csa | Green façade | Experimental                         | Puigverd Lleida, Catalonia (Spain) | de                      | South, East, West | July 2015, 12 days            | GF: metal trellis of 2 mm, air chamber of 25 cm - Plant types: <i>Boston Ivy</i> “ <i>Parthenocissus tricuspidata</i> ”, - Set point 24 °C                                                      |
| (26) | Csa | Living wall  | Experimental                         | Puigverd Lleida, Catalonia (Spain) | de                      | South, East, West | July 2015, 17 days            | Substrate: 8 cm of coconut fibre - 24 small plants each pot Plant types: <i>Rosmarinus officinalis</i> and <i>Helichrysum thianschanicum</i> ) Set point 24 °C                                  |
| (27) | Csa | Green façade | Experimental                         | Puigverd Lleida (Spain)            | de                      | South, East, West | Summer conditions             | Plant types: <i>Boston Ivy</i> “ <i>Parthenocissus tricuspidata</i> ”,                                                                                                                          |
| (27) | Csa | Living wall  | Experimental                         | Puigverd Lleida (Spain)            | de                      | South, East, West | Summer conditions             | Plant types: <i>Rosmarinus officinalis</i> and <i>Helichrysum thianschanicum</i> )                                                                                                              |
| (28) | Cfa | Living wall  | Simulation                           | Hon Kong                           | West (best orientation) |                   | Summer months (June – August) | LAI = 3 plant height 0.3 m substrate thickness 0.1 m single-storey flat floor area of 19.3 m <sup>2</sup> - Green area 6.5 m <sup>2</sup> (100% wall)                                           |
| (28) | Cfa | Living wall  | Simulation                           | Hon Kong                           | West                    |                   | Summer months (June – August) | LAI = 3 plant height 0.3 m substrate thickness 0.1 m single-storey flat floor area of 19.3 m <sup>2</sup> - Green area 75% wall                                                                 |
| (28) | Cfa | Living wall  | Simulation                           | Hon Kong                           | West                    |                   | Summer months (June – August) | LAI = 3 plant height 0.3 m substrate thickness 0.1 m single-storey flat floor area of 19.3 m <sup>2</sup> - Green area 50% wall                                                                 |

|      |     |             |            |          |      |                               |                                                                                                                                             |
|------|-----|-------------|------------|----------|------|-------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| (28) | Cfa | Living wall | Simulation | Hon Kong | West | Summer months (June – August) | LAI = 3 plant height 0.3 m substrate thickness 0.1 m single-storey flat floor area of 19.3 m <sup>2</sup> - Green area 25% wall             |
| (28) | Cfa | Living wall | Simulation | Hon Kong | West | Summer months (June – August) | Building of 50 m (L) × 50 m (W) × 100 m (H). window-wall ratio 50% for each façade. Wall surface: 2500m <sup>2</sup> , Green area 100% wall |
| (28) | Cfa | Living wall | Simulation | Hon Kong | West | Summer months (June – August) | Building of 50 m (L) × 50 m (W) × 100 m (H). window-wall ratio 50% for each façade. Wall surface: 2500m <sup>2</sup> , Green area 75% wall  |
| (28) | Cfa | Living wall | Simulation | Hon Kong | West | Summer months (June – August) | Building of 50 m (L) × 50 m (W) × 100 m (H). window-wall ratio 50% for each façade. Wall surface: 2500m <sup>2</sup> , Green area 50% wall  |
| (28) | Cfa | Living wall | Simulation | Hon Kong | West | Summer months (June – August) | Building of 50 m (L) × 50 m (W) × 100 m (H). window-wall ratio 50% for each façade. Wall surface: 2500m <sup>2</sup> , Green area 25% wall  |

In Figura 16 sono presentati i dati riguardanti la variazione di energia per raffreddamento, suddivisi a seconda dell'area climatica a cui lo studio fa riferimento.



**Figura 16. Energia di raffreddamento: variazione percentuale in seguito all'installazione di pareti verdi**

I dati riguardanti l'area climatica tropicale monsonica, con una stagione asciutta ben definita e una stagione umida molto piovosa (Am), sono relativi a due articoli, con 10 casi studio. In tutti i casi analizzati l'adozione di pareti verdi comporta una riduzione dell'energia per raffreddamento. Quando viene considerata la riduzione sull'intera stagione di raffreddamento, l'energia necessaria diminuisce tra -3.6% e -0.1%. L'effetto dell'applicazione di pareti verdi dipende dal numero di facciate di applicazione, dal loro orientamento e anche dal tipo di edificio su cui vengono applicate. La riduzione maggiore (i.e., 3.6%) è ottenuta con l'applicazione di un living wall su tutte le pareti dell'edificio, nel caso di applicazione ad un solo orientamento, invece, la riduzione maggiore (i.e., 1.1%) si ottiene con orientamento a Sud, mentre l'esposizione a Ovest comporta al massimo una riduzione pari allo 0.7%. I valori di minor riduzione sono legati all'adozione del living wall sulla tipologia edilizia ospedaliera, che presenta una riduzione di 0.3% quando tutte le pareti sono trasformate in "verdi" e di 0.1% quando l'esposizione della parete verde è Ovest. Quando viene considerata la riduzione dell'energia di raffreddamento per un unico giorno estivo molto caldo, l'adozione di una facciata verde su tutte le pareti può comportare una riduzione pari al 60.8%.

Per l'area climatica desertica arida (Bwh) sono stati considerati 9 casi studio in cui viene analizzata la riduzione dell'uso di energia sull'intera stagione di raffreddamento per l'applicazione di un living wall. Come nel caso del clima Am, l'effetto delle pareti verdi dipende dal numero di facciate, dall'orientamento e dal tipo di edificio, con valori che vanno da -6.7% a -0.3%. La massima riduzione (i.e., 6.7%) si ha con l'applicazione su tutti gli orientamenti, la massima riduzione con applicazione su un solo orientamento si ha a Sud (i.e., 3.9%), mentre applicare il living wall ad Ovest comporta una riduzione massima pari a 1.4%. L'applicazione del living wall sulla tipologia edilizia ospedaliera, invece, comporta una riduzione compresa tra 0.7%, nel caso di applicazione su tutti gli orientamenti, e 0.3%, nel caso di applicazione ad Ovest.

Considerando i dati dei 13 casi studio analizzati per il clima caldo temperato umido e con estati molto calde (Cfa), la riduzione può variare da 17.9% a 0.4%. La riduzione più consistente (i.e., 17.9%) riguarda un periodo di tempo tipicamente estivo (il mese di agosto) nel caso in cui tutte le pareti siano convertite in living wall. Nel caso di applicazione del living wall su un solo orientamento (Ovest), la riduzione dell'energia per raffreddamento diminuisce al diminuire della percentuale di parete ricoperta dal living wall: da 3% nel caso di parete

completamente ricoperta dal living wall, a 0.4% quando il living wall ricopre il 25% della parete. Un caso a sé stante è rappresentato da un caso studio che presenta la stima dell'energia risparmiata in un singolo giorno estivo, con una facciata verde applicata su tutti gli orientamenti: un tal caso la riduzione stimata è di circa il 76%.

Nel caso dell'area climatica con clima caldo temperato umido con estati calde (Cfb) è presente un solo caso studio, secondo il quale l'applicazione di un living wall sulle pareti esposte ad Est e ad Ovest, porterebbe ad una riduzione dell'energia per raffrescamento pari al 50.6%. Nel caso di questa zona climatica, è evidente che il numero di casi studio deve essere ulteriormente ampliato per ottenere un quadro statisticamente significativo.

Per l'area climatica calda temperata con estati molto calde e secche (Csa) sono stati analizzati 12 casi studio. I risultati indicano che la riduzione dell'energia per raffrescamento può variare in modo anche consistente al variare della temperatura dell'aria interna all'edificio e della tipologia di parete verde. La riduzione più consistente (i.e., circa 59%) è ottenuta con un living wall installato a Sud, Est e Ovest, con una temperatura interna di 24 °C, mentre l'adozione di una facciata verde installata con gli stessi orientamenti (Sud, Est, Ovest) ed una temperatura interna mantenuta a 18 °C porta una riduzione di solo il 5%.

Per l'area climatica calda temperata con estati calde e secche (Csb) sono stati analizzati 10 casi studio nei quali è considerata l'applicazione di living wall. La riduzione dell'energia per raffrescamento per l'intera stagione calda dipende dal numero di facciate in cui avviene l'applicazione, dall'orientamento e dal tipo di edificio. La massima riduzione (i.e., 7.5%) si ha con l'applicazione su tutti gli orientamenti; se l'applicazione avviene su un solo orientamento, la riduzione maggiore (i.e., 3.7%) si ha a Sud. Come già visto per le zone climatiche Am e Bwh, l'adozione di pareti verdi nel caso in cui l'edificio sia un ospedale, comporta riduzioni di energia più contenute: 0.1% nel caso di applicazione a Sud, sino a non avere riduzione nel caso di applicazione su tutti gli orientamenti. Un caso a sé stante è rappresentato dalla stima dell'energia risparmiata, sulla base della misura delle temperature superficiali per un'intera stagione di raffrescamento, con un living wall applicato a Sud, in cui la riduzione è valutata pari al 26.5%.

I dati riguardanti l'area con clima temperato umido con inverno asciutto ed estate molto calda (Cwa) sono relativi a 5 casi studio. La variazione dell'energia per raffrescamento, calcolata per l'intera stagione di raffrescamento, è compresa tra -17% e +1%, e varia al variare dal numero di facciate in cui avviene l'applicazione di un living wall, e dall'orientamento. La massima riduzione (i.e., 17%) si registra quando il living wall è applicato a tutti gli orientamenti. Quando il living wall è applicato su un orientamento solo, l'energia di raffrescamento si riduce del 12% con il living wall applicato ad Est, ed arriva ad aumentare dell'1% nel caso di living wall applicato a Nord.

Per l'area con clima continentale umido con estate molto calda (Dfa), sono stati considerati 9 casi studio in cui viene analizzata la riduzione sull'intera stagione di raffrescamento per l'applicazione di un living wall. Come nel caso dei climi Am, Bwh e Csb, l'effetto delle pareti verdi dipende dal numero di facciate di applicazione della parete verde, dall'orientamento e dal tipo di edificio, con valori che vanno da -5.3% sino ad essere nulli. La massima riduzione (i.e., 5.3%) si ha con l'applicazione su tutti gli orientamenti, la massima riduzione (i.e., 2.4%) con applicazione su un solo orientamento si ha a Sud, mentre applicare il living wall ad Ovest comporta una riduzione massima pari all'1.4%. L'applicazione del living wall sulla tipologia edilizia ospedaliera, invece, non comporta alcuna variazione nell'energia per raffrescamento, indipendentemente dal numero di orientamenti di applicazione, o dall'orientamento nel caso di applicazione su facciata singola.

### Effetto sulla temperatura superficiale e sull'isola di calore urbana

Dagli articoli revisionati circa le pareti verdi e il loro impatto sulla temperatura superficiale e sull'isola di calore urbana sono stati estratti 83 casi di studio. Questi sono stati suddivisi in gruppi omogenei usando, in prima istanza, come parametro discretizzante l'area climatica a cui lo studio fa riferimento. Gli studi sono stati poi suddivisi a seconda che riportassero dati circa gli effetti dell'installazione della parete verde sulla temperatura dell'aria o sulla temperatura superficiale sia durante le ore diurne sia durante quelle notturne. I dati estratti sono stati sintetizzati in Tabella 2 e Tabella 3.



**Tabella 2. Revisione della letteratura pubblicata. Effetto dell'installazione delle pareti verdi sulle temperature diurne**

| Reference | Green façade typology              | Kind of study | City             | Climate (16) | zone | Green façade orientation | Climate conditions                  | Notes                                                                                                                                                                                                    |
|-----------|------------------------------------|---------------|------------------|--------------|------|--------------------------|-------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| (29)      | As in ENVI-met v 4.3               | Modelling     | Singapore        | Af           |      | North                    | Low radiation conditions            | The green façade is installed in a courtyard surrounded by high-rise buildings.                                                                                                                          |
| (29)      | As in ENVI-met v 4.3               | Modelling     | Singapore        | Af           |      | South                    | Low radiation conditions            | The green façade is installed in a courtyard surrounded by high-rise buildings                                                                                                                           |
| (29)      | As in ENVI-met v 4.3               | Modelling     | Singapore        | Af           |      | East                     | Low radiation conditions            | The green façade is installed in a courtyard surrounded by high-rise buildings                                                                                                                           |
| (29)      | As in ENVI-met v 4.3               | Modelling     | Singapore        | Af           |      | West                     | Low radiation conditions            | The green façade is installed in a courtyard surrounded by high-rise buildings                                                                                                                           |
| (29)      | As in ENVI-met v 4.3               | Modelling     | Singapore        | Af           |      | North                    | High radiation conditions           | The green façade is installed in a courtyard surrounded by high-rise buildings.                                                                                                                          |
| (29)      | As in ENVI-met v 4.3               | Modelling     | Singapore        | Af           |      | South                    | High radiation conditions           | The green façade is installed in a courtyard surrounded by high-rise buildings                                                                                                                           |
| (29)      | As in ENVI-met v 4.3               | Modelling     | Singapore        | Af           |      | East                     | High radiation conditions           | The green façade is installed in a courtyard surrounded by high-rise buildings                                                                                                                           |
| (29)      | As in ENVI-met v 4.3               | Modelling     | Singapore        | Af           |      | West                     | High radiation conditions           | The green façade is installed in a courtyard surrounded by high-rise buildings                                                                                                                           |
| (30)      | Green façade                       | Modelling     | Chenzhou (China) | Cfa          |      | Not specified            | Typical summer day in Chenzhou      | The model was run considering the meteorological condition of a summer day (23 <sup>rd</sup> July 2016). The specie planted is Ivy. Its thickness is 0.3; its LAI is 1.5; leaf angle distribution is 0.7 |
| (30)      | Green wall with boxes <sup>5</sup> | Modelling     | Chenzhou (China) | Cfa          |      | Not specified            | Typical summer day in Chenzhou      | The model was run considering the meteorological condition of a summer day (23 <sup>rd</sup> July 2016). The specie planted is Ivy. Its thickness is 0.3; its LAI is 1.5; leaf angle distribution is 0.7 |
| (30)      | Living wall                        | Modelling     | Chenzhou (China) | Cfa          |      | Not specified            | Typical summer day in Chenzhou      | The model was run considering the meteorological condition of a summer day (23 <sup>rd</sup> July 2016). The specie planted is Ivy. Its thickness is 0.3; its LAI is 1.5; leaf angle distribution is 0.7 |
| (31)      | Green façade                       | Experimental  | Bari (Italy)     | Csa          |      | South                    | Summer (28 <sup>th</sup> June 2016) | Thermal conductivity: 0.28 W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>                                                                                                                                             |

|      |              |              |               |     |       |                                                                              |                                                                                                                                                                                                                         |
|------|--------------|--------------|---------------|-----|-------|------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|      |              |              |               |     |       |                                                                              | Plant species: Pandorea jasminoides variegated<br>Plants are placed on an iron net at a distance of 15 cm from the wall<br>LAI: 1.5-3.5 through the year<br>Thermal conductivity: 0.55 Wm <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> |
| (31) | Green façade | Experimental | Bari (Italy)  | Csa | South | Summer (Shaded. i.e., low incoming radiation) (28 <sup>th</sup> June 2016)   | Plant species: Rhyncospermum jasminoides<br>Plants are placed on an iron net at a distance of 15 cm from the wall<br>LAI: 2.0-4.0 through the year<br>Thermal conductivity: 0.28 W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>      |
| (31) | Green façade | Experimental | Bari (Italy)  | Csa | South | Summer (23 <sup>rd</sup> July 2016)                                          | Plant species: Pandorea jasminoides variegated<br>Plants are placed on an iron net at a distance of 15 cm from the wall<br>LAI: 1.5-3.5 through the year<br>Thermal conductivity: 0.55 Wm <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> |
| (31) | Green façade | Experimental | Bari (Italy)  | Csa | South | Summer (Shaded. i.e., low incoming radiation) (23 <sup>rd</sup> July 2016)   | Plant species: Rhyncospermum jasminoides<br>Plants are placed on an iron net at a distance of 15 cm from the wall<br>LAI: 2.0-4.0 through the year<br>Thermal conductivity: 0.28 W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>      |
| (31) | Green façade | Experimental | Bari (Italy)  | Csa | South | Summer (27 <sup>th</sup> August 2016)                                        | Plant species: Pandorea jasminoides variegated<br>Plants are placed on an iron net at a distance of 15 cm from the wall<br>LAI: 1.5-3.5 through the year<br>Thermal conductivity: 0.55 Wm <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> |
| (31) | Green façade | Experimental | Bari (Italy)  | Csa | South | Summer (Shaded. i.e., low incoming radiation) (27 <sup>th</sup> August 2016) | Plant species: Rhyncospermum jasminoides<br>Plants are placed on an iron net at a distance of 15 cm from the wall<br>LAI: 2.0-4.0 through the year                                                                      |
| (32) | Living wall  | Experimental | Turin (Italy) | Cfa | South | Winter sunny day                                                             | Plant species: Lonicera nitida L<br>Substrate: 50% coconut fibre, Hydrotentors, and mycorrhizae, and 50% shredded felt                                                                                                  |
| (32) | Living wall  | Experimental | Turin (Italy) | Cfa | South | Winter sunny day                                                             | Plant species: Lonicera nitida L<br>Substrate: 50% coconut fibre, Hydrotentors, and mycorrhizae, and 50% shredded felt                                                                                                  |
| (32) | Living wall  | Experimental | Turin (Italy) | Cfa | South | Winter cloudy day                                                            | Plant species: Lonicera nitida L<br>Substrate: 50% coconut fibre, Hydrotentors, and mycorrhizae, and 50% shredded felt                                                                                                  |
| (32) | Living wall  | Experimental | Turin (Italy) | Cfa | South | Winter cloudy day                                                            | Plant species: Lonicera nitida L<br>Substrate: 50% coconut fibre, Hydrotentors, and mycorrhizae, and 50% shredded felt                                                                                                  |

|           |              |              |                                       |     |                          |                                                         |                                                                                                                        |
|-----------|--------------|--------------|---------------------------------------|-----|--------------------------|---------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| (32)      | Living wall  | Experimental | Turin (Italy)                         | Cfa | South                    | Summer sunny day                                        | Plant species: Lonicera nitida L. Substrate: coconut fibre, Hydroretentors, and mycorrhizae                            |
| (32)      | Living wall  | Experimental | Turin (Italy)                         | Cfa | South                    | Summer sunny day                                        | Plant species: Lonicera nitida L. Substrate: 50% coconut fibre, Hydroretentors, and mycorrhizae, and 50% shredded felt |
| (33)      | Green façade | Experimental | Ljubljana (Slovenia)                  | Dfb | South                    | Summer                                                  | Green façade with an 8 cm plant air gap with the façade<br>Plant species: Phaseolus Vulgaris L. LAI: 6.1               |
| (33)      | Green façade | Experimental | Ljubljana (Slovenia)                  | Dfb | South                    | Summer                                                  | Green façade with an 8 cm plant air gap with the façade<br>Plant species: Phaseolus Vulgaris L. LAI: 7.2               |
| (23) (34) | Green façade | Experimental | La Rochelle (France)                  | Cfb | West                     | Summer (August 2012)                                    |                                                                                                                        |
| (35)      | Green façade | Modelling    | Mohandessin (Egypt)                   | BWh | City block scale         | Summer (August)                                         | Thickness: 10 cm                                                                                                       |
| (35)      | Green façade | Modelling    | Mohandessin (Egypt)                   | BWh | City block scale         | Summer (August)                                         | Thickness: 30 cm                                                                                                       |
| (35)      | Green façade | Modelling    | Mohandessin (Egypt)                   | BWh | North (street scale)     | Summer (August)                                         |                                                                                                                        |
| (36)      | Green façade | Modelling    | Tehran (Iran)                         | Csa | East (street scale)      | Summer                                                  |                                                                                                                        |
| (37)      | Green façade | Modelling    | Colombo metropolitan area (Sri Lanka) | Af  | North-South (city scale) | Summer (29 <sup>th</sup> -30 <sup>th</sup> August 2016) | 50% of surface covered with green façades                                                                              |
| (38)      | Green façade | Experimental | Hong Kong                             | Cfa | North                    | Summer sunny day                                        | Plant species: Bauhinia corymbosa                                                                                      |
| (38)      | Green façade | Experimental | Hong Kong                             | Cfa | North                    | Summer sunny day                                        | Plant species: Pyrostegia venusta                                                                                      |
| (38)      | Green façade | Experimental | Hong Kong                             | Cfa | North                    | Summer sunny day                                        | Plant species: Ficus pumila                                                                                            |
| (38)      | Green façade | Experimental | Hong Kong                             | Cfa | South                    | Summer sunny day                                        | Plant species: Bauhinia corymbosa                                                                                      |
| (38)      | Green façade | Experimental | Hong Kong                             | Cfa | South                    | Summer sunny day                                        | Plant species: Pyrostegia venusta                                                                                      |
| (38)      | Green façade | Experimental | Hong Kong                             | Cfa | South                    | Summer sunny day                                        | Plant species: Ficus pumila                                                                                            |
| (38)      | Green façade | Experimental | Hong Kong                             | Cfa | East                     | Summer sunny day                                        | Plant species: Bauhinia corymbosa                                                                                      |
| (38)      | Green façade | Experimental | Hong Kong                             | Cfa | East                     | Summer sunny day                                        | Plant species: Pyrostegia venusta                                                                                      |
| (38)      | Green façade | Experimental | Hong Kong                             | Cfa | East                     | Summer sunny day                                        | Plant species: Ficus pumila                                                                                            |
| (38)      | Green façade | Experimental | Hong Kong                             | Cfa | West                     | Summer sunny day                                        | Plant species: Bauhinia corymbosa                                                                                      |
| (38)      | Green façade | Experimental | Hong Kong                             | Cfa | West                     | Summer sunny day                                        | Plant species: Pyrostegia venusta                                                                                      |

|      |              |              |           |     |            |                                                          |                                                     |
|------|--------------|--------------|-----------|-----|------------|----------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| (38) | Green façade | Experimental | Hong Kong | Cfa | West       | Summer sunny day                                         | Plant species: Ficus pumila                         |
| (38) | Green façade | Experimental | Hong Kong | Cfa | North      | Summer cloudy day                                        | Plant species: Bauhinia corymbosa                   |
| (38) | Green façade | Experimental | Hong Kong | Cfa | North      | Summer cloudy day                                        | Plant species: Pyrostegia venusta                   |
| (38) | Green façade | Experimental | Hong Kong | Cfa | North      | Summer cloudy day                                        | Plant species: Ficus pumila                         |
| (38) | Green façade | Experimental | Hong Kong | Cfa | South      | Summer cloudy day                                        | Plant species: Bauhinia corymbosa                   |
| (38) | Green façade | Experimental | Hong Kong | Cfa | South      | Summer cloudy day                                        | Plant species: Pyrostegia venusta                   |
| (38) | Green façade | Experimental | Hong Kong | Cfa | South      | Summer cloudy day                                        | Plant species: Ficus pumila                         |
| (38) | Green façade | Experimental | Hong Kong | Cfa | East       | Summer cloudy day                                        | Plant species: Bauhinia corymbosa                   |
| (38) | Green façade | Experimental | Hong Kong | Cfa | East       | Summer cloudy day                                        | Plant species: Pyrostegia venusta                   |
| (38) | Green façade | Experimental | Hong Kong | Cfa | East       | Summer cloudy day                                        | Plant species: Ficus pumila                         |
| (38) | Green façade | Experimental | Hong Kong | Cfa | West       | Summer cloudy day                                        | Plant species: Bauhinia corymbosa                   |
| (38) | Green façade | Experimental | Hong Kong | Cfa | West       | Summer cloudy day                                        | Plant species: Pyrostegia venusta                   |
| (38) | Green façade | Experimental | Hong Kong | Cfa | West       | Summer cloudy day                                        | Plant species: Ficus pumila                         |
| (38) | Green façade | Experimental | Hong Kong | Cfa | North      | Summer rainy day                                         | Plant species: Bauhinia corymbosa                   |
| (38) | Green façade | Experimental | Hong Kong | Cfa | North      | Summer rainy day                                         | Plant species: Pyrostegia venusta                   |
| (38) | Green façade | Experimental | Hong Kong | Cfa | North      | Summer rainy day                                         | Plant species: Ficus pumila                         |
| (38) | Green façade | Experimental | Hong Kong | Cfa | South      | Summer rainy day                                         | Plant species: Bauhinia corymbosa                   |
| (38) | Green façade | Experimental | Hong Kong | Cfa | South      | Summer rainy day                                         | Plant species: Pyrostegia venusta                   |
| (38) | Green façade | Experimental | Hong Kong | Cfa | South      | Summer rainy day                                         | Plant species: Ficus pumila                         |
| (38) | Green façade | Experimental | Hong Kong | Cfa | East       | Summer rainy day                                         | Plant species: Bauhinia corymbosa                   |
| (38) | Green façade | Experimental | Hong Kong | Cfa | East       | Summer rainy day                                         | Plant species: Pyrostegia venusta                   |
| (38) | Green façade | Experimental | Hong Kong | Cfa | East       | Summer rainy day                                         | Plant species: Ficus pumila                         |
| (38) | Green façade | Experimental | Hong Kong | Cfa | West       | Summer rainy day                                         | Plant species: Bauhinia corymbosa                   |
| (38) | Green façade | Experimental | Hong Kong | Cfa | West       | Summer rainy day                                         | Plant species: Pyrostegia venusta                   |
| (38) | Green façade | Experimental | Hong Kong | Cfa | West       | Summer rainy day                                         | Plant species: Ficus pumila                         |
| (39) | Living wall  | Experimental | London    | Cfb | East       | Summer (7 <sup>th</sup> June 2016).<br>Typical sunny day | Plant species: Ivy, ferns                           |
| (39) | Living wall  | Experimental | London    | Cfb | East       | Summer (15 <sup>th</sup> June 2016).<br>Cold day         | Plant species: Ivy, ferns                           |
| (40) | Living wall  | Experimental | Madrid    | Csa | South-east | Summer 2016) <sup>10</sup>                               | (September Measurement taken at 0.5 m from the wall |
| (40) | Living wall  | Experimental | Madrid    | Csa | South-east | Summer 2016) <sup>10</sup>                               | (September Measurement taken at 1.5 m from the wall |
| (40) | Living wall  | Experimental | Madrid    | Csa | South-east | Summer 2016) <sup>10</sup>                               | (September Measurement taken at 3 m from the wall   |

|      |             |              |                      |     |            |                                       |                                                                                                                                    |
|------|-------------|--------------|----------------------|-----|------------|---------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| (40) | Living wall | Experimental | Madrid               | Csa | South-east | Summer (September 2016) <sup>10</sup> | Measurement taken at 5 m from the wall                                                                                             |
| (40) | Living wall | Experimental | Madrid               | Csa | South-east | Autumn (November 2016) <sup>10</sup>  | Measurement taken at 0.5 m from the wall                                                                                           |
| (40) | Living wall | Experimental | Madrid               | Csa | South-east | Autumn (November 2016) <sup>10</sup>  | Measurement taken at 1.5 m from the wall                                                                                           |
| (40) | Living wall | Experimental | Madrid               | Csa | South-east | Autumn (November 2016) <sup>10</sup>  | Measurement taken at 3 m from the wall                                                                                             |
| (40) | Living wall | Experimental | Madrid               | Csa | South-east | Autumn (November 2016) <sup>10</sup>  | Measurement taken at 5 m from the wall                                                                                             |
| (41) | Living wall | Experimental | Adelaide (Australia) | Csa | West       | Warm season                           | Plant species: Fytogreen, Holman and Elmich                                                                                        |
| (41) | Living wall | Experimental | Adelaide (Australia) | Csa | West       | Cold season                           | Plant species: Fytogreen, Holman and Elmich                                                                                        |
| (41) | Living wall | Experimental | Adelaide (Australia) | Csa | West       | Warm season                           | Plant species: Fytogreen, Holman and Elmich. The difference in air temperature is calculated at a distance of 0.5 m from the walls |
| (41) | Living wall | Experimental | Adelaide (Australia) | Csa | West       | Cold season                           | Plant species: Fytogreen, Holman and Elmich. The difference in air temperature is calculated at a distance of 0.5 m from the walls |
| (41) | Living wall | Experimental | Adelaide (Australia) | Csa | West       | Warm season                           | Plant species: Fytogreen, Holman and Elmich. The difference in air temperature is calculated at a distance of 1 m from the walls   |
| (41) | Living wall | Experimental | Adelaide (Australia) | Csa | West       | Cold season                           | Plant species: Fytogreen, Holman and Elmich. The difference in air temperature is calculated at a distance of 1 m from the walls   |

<sup>1</sup>  $\Delta T$  is calculated comparing the surface temperature of the green wall with the surface temperature of a bare wall

<sup>2</sup> Difference in temperature related to the daily hours

<sup>3</sup> Near-façade (< 3 m) difference in air temperature

<sup>4</sup> Temperature related to 1 m from the pedestrian level

<sup>5</sup> Boxes containing plants are placed at different heights on the wall

<sup>6</sup> Living wall with substrate constituted by fibers, perlite, and volcanic ash

<sup>7</sup> Surface temperature of the façade behind the green façade

<sup>8</sup> At 2 m above the ground

<sup>9</sup> At 1.5 m above the ground

<sup>10</sup> Average value calculated on nine measurements

<sup>11</sup> Maximum difference in daily temperature. Calculated averaging the differences in max temperatures

**Tabella 3. Revisione della letteratura pubblicata. Effetto dell'installazione delle pareti verdi sulle temperature notturne**

| Reference | Green façade typology              | Kind of study | City             | Climate (16) | zone | Green façade orientation | Climate conditions             | Notes                                                                                                                                                                                                    |
|-----------|------------------------------------|---------------|------------------|--------------|------|--------------------------|--------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| (29)      | As in ENVI-met v 4.3               | Modelling     | Singapore        | Af           |      | North                    | Low radiation conditions       | The green façade is installed in a courtyard surrounded by high-rise buildings                                                                                                                           |
| (29)      | As in ENVI-met v 4.3               | Modelling     | Singapore        | Af           |      | South                    | Low radiation conditions       | The green façade is installed in a courtyard surrounded by high-rise buildings                                                                                                                           |
| (29)      | As in ENVI-met v 4.3               | Modelling     | Singapore        | Af           |      | East                     | Low radiation conditions       | The green façade is installed in a courtyard surrounded by high-rise buildings                                                                                                                           |
| (29)      | As in ENVI-met v 4.3               | Modelling     | Singapore        | Af           |      | West                     | Low radiation conditions       | The green façade is installed in a courtyard surrounded by high-rise buildings                                                                                                                           |
| (29)      | As in ENVI-met v 4.3               | Modelling     | Singapore        | Af           |      | North                    | High radiation conditions      | The green façade is installed in a courtyard surrounded by high-rise buildings.                                                                                                                          |
| (29)      | As in ENVI-met v 4.3               | Modelling     | Singapore        | Af           |      | South                    | High radiation conditions      | The green façade is installed in a courtyard surrounded by high-rise buildings                                                                                                                           |
| (29)      | As in ENVI-met v 4.3               | Modelling     | Singapore        | Af           |      | East                     | High radiation conditions      | The green façade is installed in a courtyard surrounded by high-rise buildings                                                                                                                           |
| (29)      | As in ENVI-met v 4.3               | Modelling     | Singapore        | Af           |      | West                     | High radiation conditions      | The green façade is installed in a courtyard surrounded by high-rise buildings                                                                                                                           |
| (30)      | Green façade                       | Modelling     | Chenzhou (China) | Cfa          |      | Not specified            | Typical summer day in Chenzhou | The model was run considering the meteorological condition of a summer day (23 <sup>rd</sup> July 2016). The specie planted is Ivy. Its thickness is 0.3; its LAI is 1.5; leaf angle distribution is 0.7 |
| (30)      | Green wall with boxes <sup>5</sup> | Modelling     | Chenzhou (China) | Cfa          |      | Not specified            | Typical summer day in Chenzhou | The model was run considering the meteorological condition of a summer day (23 <sup>rd</sup> July 2016). The specie planted is Ivy. Its thickness is 0.3; its LAI is 1.5; leaf angle distribution is 0.7 |
| (30)      | Living wall <sup>6</sup>           | Modelling     | Chenzhou (China) | Cfa          |      | Not specified            | Typical summer day in Chenzhou | The model was run considering the meteorological condition of a summer day (23 <sup>rd</sup> July 2016). The specie planted is                                                                           |

|      |              |              |               |     |       |                                                                |                                                                                                                                                                                                                               |
|------|--------------|--------------|---------------|-----|-------|----------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|      |              |              |               |     |       |                                                                | Ivy. Its thickness is 0.3; its LAI is 1.5; leaf angle distribution is 0.7                                                                                                                                                     |
| (31) | Green facade | Experimental | Bari (Italy)  | Csa | South | Summer (28 June 2016)                                          | Thermal conductivity: $0.28 \text{ W m}^{-1}\text{K}^{-1}$<br>Plant species: <i>Pandorea jasminoides</i> variegated<br>Plants are placed on an iron net at a distance of 15 cm from the wall<br>LAI: 1.5-3.5 through the year |
| (31) | Green facade | Experimental | Bari (Italy)  | Csa | South | Summer (Shaded. I.e., low incoming radiation) (28 June 2016)   | Thermal conductivity: $0.55 \text{ W m}^{-1}\text{K}^{-1}$<br>Plant species: <i>Rhynchospermum jasminoides</i><br>Plants are placed on an iron net at a distance of 15 cm from the wall<br>LAI: 2.0-4.0 through the year      |
| (31) | Green facade | Experimental | Bari (Italy)  | Csa | South | Summer (23 July 2016)                                          | Thermal conductivity: $0.28 \text{ W m}^{-1}\text{K}^{-1}$<br>Plant species: <i>Pandorea jasminoides</i> variegated<br>Plants are placed on an iron net at a distance of 15 cm from the wall<br>LAI: 1.5-3.5 through the year |
| (31) | Green facade | Experimental | Bari (Italy)  | Csa | South | Summer (Shaded. I.e., low incoming radiation) (23 July 2016)   | Thermal conductivity: $0.55 \text{ W m}^{-1}\text{K}^{-1}$<br>Plant species: <i>Rhynchospermum jasminoides</i><br>Plants are placed on an iron net at a distance of 15 cm from the wall<br>LAI: 2.0-4.0 through the year      |
| (31) | Green facade | Experimental | Bari (Italy)  | Csa | South | Summer (27 August 2016)                                        | Thermal conductivity: $0.28 \text{ W m}^{-1}\text{K}^{-1}$<br>Plant species: <i>Pandorea jasminoides</i> variegated<br>Plants are placed on an iron net at a distance of 15 cm from the wall<br>LAI: 1.5-3.5 through the year |
| (31) | Green facade | Experimental | Bari (Italy)  | Csa | South | Summer (Shaded. I.e., low incoming radiation) (27 August 2016) | Thermal conductivity: $0.55 \text{ W m}^{-1}\text{K}^{-1}$<br>Plant species: <i>Rhynchospermum jasminoides</i><br>Plants are placed on an iron net at a distance of 15 cm from the wall<br>LAI: 2.0-4.0 through the year      |
| (32) | Living wall  | Experimental | Turin (Italy) | Cfa | South | Winter sunny day                                               | Plant species: <i>Lonicera nitida</i> L<br>Substrate: coconut fibre, Hydroretentors, and mycorrhizae                                                                                                                          |
| (32) | Living wall  | Experimental | Turin (Italy) | Cfa | South | Winter sunny day                                               | Plant species: <i>Lonicera nitida</i> L.<br>Substrate: 50% coconut fibre, Hydroretentors, and mycorrhizae, and 50% shredded felt                                                                                              |
| (32) | Living wall  | Experimental | Turin (Italy) | Cfa | South | Winter cloudy day                                              | Plant species: <i>Lonicera nitida</i> L<br>Substrate: coconut fibre, Hydroretentors, and mycorrhizae                                                                                                                          |

|           |              |              |                                       |     |                          |                                                         |                                                                                                                                  |
|-----------|--------------|--------------|---------------------------------------|-----|--------------------------|---------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| (32)      | Living wall  | Experimental | Turin (Italy)                         | Cfa | South                    | Winter cloudy day                                       | Plant species: <i>Lonicera nitida</i> L.<br>Substrate: 50% coconut fibre, Hydroretentors, and mycorrhizae, and 50% shredded felt |
| (32)      | Living wall  | Experimental | Turin (Italy)                         | Cfa | South                    | Summer sunny day                                        | Plant species: <i>Lonicera nitida</i> L<br>Substrate: coconut fibre, Hydroretentors, and mycorrhizae                             |
| (32)      | Living wall  | Experimental | Turin (Italy)                         | Cfa | South                    | Summer sunny day                                        | Plant species: <i>Lonicera nitida</i> L.<br>Substrate: 50% coconut fibre, Hydroretentors, and mycorrhizae, and 50% shredded felt |
| (33)      | Green façade | Experimental | Ljubljana (Slovenia)                  | Dfb | South                    | Summer                                                  | Green façade with an 8 cm plant air gap with the façade<br>Plant species: <i>Phaseolus Vulgaris</i> L<br>LAI: 6.1                |
| (33)      | Green façade | Experimental | Ljubljana (Slovenia)                  | Dfb | South                    | Summer                                                  | Green façade with an 8 cm plant air gap with the façade<br>Plant species: <i>Phaseolus Vulgaris</i> L LAI: 7.2                   |
| (23) (34) | Green façade | Experimental | La Rochelle (France)                  | Cfb | West                     | Summer (August 2012)                                    |                                                                                                                                  |
| (37)      | Green façade | Modelling    | Colombo metropolitan area (Sri Lanka) | Af  | North-South (city scale) | Summer (29 <sup>th</sup> -30 <sup>th</sup> August 2016) | 50% of surface covered with green façades                                                                                        |
| (38)      | Green façade | Experimental | Hong Kong                             | Cfa | West                     | Summer sunny day                                        | Plant species: <i>Bauhinia corymbosa</i>                                                                                         |
| (38)      | Green façade | Experimental | Hong Kong                             | Cfa | North                    | Summer sunny day                                        | Plant species: <i>Pyrostegia venusta</i>                                                                                         |
| (38)      | Green façade | Experimental | Hong Kong                             | Cfa | North                    | Summer sunny day                                        | Plant species: <i>Ficus pumila</i>                                                                                               |
| (38)      | Green façade | Experimental | Hong Kong                             | Cfa | South                    | Summer sunny day                                        | Plant species: <i>Bauhinia corymbosa</i>                                                                                         |
| (38)      | Green façade | Experimental | Hong Kong                             | Cfa | South                    | Summer sunny day                                        | Plant species: <i>Pyrostegia venusta</i>                                                                                         |
| (38)      | Green façade | Experimental | Hong Kong                             | Cfa | South                    | Summer sunny day                                        | Plant species: <i>Ficus pumila</i>                                                                                               |
| (38)      | Green façade | Experimental | Hong Kong                             | Cfa | East                     | Summer sunny day                                        | Plant species: <i>Bauhinia corymbosa</i>                                                                                         |
| (38)      | Green façade | Experimental | Hong Kong                             | Cfa | East                     | Summer sunny day                                        | Plant species: <i>Pyrostegia venusta</i>                                                                                         |
| (38)      | Green façade | Experimental | Hong Kong                             | Cfa | East                     | Summer sunny day                                        | Plant species: <i>Ficus pumila</i>                                                                                               |
| (38)      | Green façade | Experimental | Hong Kong                             | Cfa | West                     | Summer sunny day                                        | Plant species: <i>Bauhinia corymbosa</i>                                                                                         |
| (38)      | Green façade | Experimental | Hong Kong                             | Cfa | West                     | Summer sunny day                                        | Plant species: <i>Pyrostegia venusta</i>                                                                                         |
| (38)      | Green façade | Experimental | Hong Kong                             | Cfa | West                     | Summer sunny day                                        | Plant species: <i>Ficus pumila</i>                                                                                               |
| (38)      | Green façade | Experimental | Hong Kong                             | Cfa | North                    | Summer cloudy day                                       | Plant species: <i>Bauhinia corymbosa</i>                                                                                         |
| (38)      | Green façade | Experimental | Hong Kong                             | Cfa | North                    | Summer cloudy day                                       | Plant species: <i>Pyrostegia venusta</i>                                                                                         |



|      |              |              |                      |     |       |                                                          |                                                                                                                                    |
|------|--------------|--------------|----------------------|-----|-------|----------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| (38) | Green façade | Experimental | Hong Kong            | Cfa | North | Summer cloudy day                                        | Plant species: Ficus pumila                                                                                                        |
| (38) | Green façade | Experimental | Hong Kong            | Cfa | South | Summer cloudy day                                        | Plant species: Bauhinia corymbosa                                                                                                  |
| (38) | Green façade | Experimental | Hong Kong            | Cfa | South | Summer cloudy day                                        | Plant species: Pyrostegia venusta                                                                                                  |
| (38) | Green façade | Experimental | Hong Kong            | Cfa | South | Summer cloudy day                                        | Plant species: Ficus pumila                                                                                                        |
| (38) | Green façade | Experimental | Hong Kong            | Cfa | East  | Summer cloudy day                                        | Plant species: Bauhinia corymbosa                                                                                                  |
| (38) | Green façade | Experimental | Hong Kong            | Cfa | East  | Summer cloudy day                                        | Plant species: Pyrostegia venusta                                                                                                  |
| (38) | Green façade | Experimental | Hong Kong            | Cfa | East  | Summer cloudy day                                        | Plant species: Ficus pumila                                                                                                        |
| (38) | Green façade | Experimental | Hong Kong            | Cfa | West  | Summer cloudy day                                        | Plant species: Bauhinia corymbosa                                                                                                  |
| (38) | Green façade | Experimental | Hong Kong            | Cfa | West  | Summer cloudy day                                        | Plant species: Pyrostegia venusta                                                                                                  |
| (38) | Green façade | Experimental | Hong Kong            | Cfa | West  | Summer cloudy day                                        | Plant species: Ficus pumila                                                                                                        |
| (38) | Green façade | Experimental | Hong Kong            | Cfa | North | Summer rainy day                                         | Plant species: Bauhinia corymbosa                                                                                                  |
| (38) | Green façade | Experimental | Hong Kong            | Cfa | North | Summer rainy day                                         | Plant species: Pyrostegia venusta                                                                                                  |
| (38) | Green façade | Experimental | Hong Kong            | Cfa | North | Summer rainy day                                         | Plant species: Ficus pumila                                                                                                        |
| (38) | Green façade | Experimental | Hong Kong            | Cfa | South | Summer rainy day                                         | Plant species: Bauhinia corymbosa                                                                                                  |
| (38) | Green façade | Experimental | Hong Kong            | Cfa | South | Summer rainy day                                         | Plant species: Pyrostegia venusta                                                                                                  |
| (38) | Green façade | Experimental | Hong Kong            | Cfa | South | Summer rainy day                                         | Plant species: Ficus pumila                                                                                                        |
| (38) | Green façade | Experimental | Hong Kong            | Cfa | East  | Summer rainy day                                         | Plant species: Bauhinia corymbosa                                                                                                  |
| (38) | Green façade | Experimental | Hong Kong            | Cfa | East  | Summer rainy day                                         | Plant species: Pyrostegia venusta                                                                                                  |
| (38) | Green façade | Experimental | Hong Kong            | Cfa | East  | Summer rainy day                                         | Plant species: Ficus pumila                                                                                                        |
| (38) | Green façade | Experimental | Hong Kong            | Cfa | West  | Summer rainy day                                         | Plant species: Bauhinia corymbosa                                                                                                  |
| (38) | Green façade | Experimental | Hong Kong            | Cfa | West  | Summer rainy day                                         | Plant species: Pyrostegia venusta                                                                                                  |
| (38) | Green façade | Experimental | Hong Kong            | Cfa | West  | Summer rainy day                                         | Plant species: Ficus pumila                                                                                                        |
| (39) | Living wall  | Experimental | London               | Cfb | East  | Summer (7 <sup>th</sup> June 2016).<br>Typical sunny day | Plant species: Ivy, ferns                                                                                                          |
| (39) | Living wall  | Experimental | London               | Cfb | East  | Summer (15 <sup>th</sup> June 2016).<br>Cold day         | Plant species: Ivy, ferns                                                                                                          |
| (41) | Living wall  | Experimental | Adelaide (Australia) | Csa | West  | Warm season                                              | Plant species: Fytogreen, Holman and Elmich                                                                                        |
| (41) | Living wall  | Experimental | Adelaide (Australia) | Csa | West  | Cold season                                              | Plant species: Fytogreen, Holman and Elmich                                                                                        |
| (41) | Living wall  | Experimental | Adelaide (Australia) | Csa | West  | Warm season                                              | Plant species: Fytogreen, Holman and Elmich. The difference in air temperature is calculated at a distance of 0.5 m from the walls |

|             |             |              |                         |     |      |             |                                                                                                                                    |
|-------------|-------------|--------------|-------------------------|-----|------|-------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>(41)</b> | Living wall | Experimental | Adelaide<br>(Australia) | Csa | West | Cold season | Plant species: Fytogreen, Holman and Elmich. The difference in air temperature is calculated at a distance of 0.5 m from the walls |
| <b>(41)</b> | Living wall | Experimental | Adelaide<br>(Australia) | Csa | West | Warm season | Plant species: Fytogreen, Holman and Elmich. The difference in air temperature is calculated at a distance of 1 m from the walls   |
| <b>(41)</b> | Living wall | Experimental | Adelaide<br>(Australia) | Csa | West | Cold season | Plant species: Fytogreen, Holman and Elmich. The difference in air temperature is calculated at a distance of 1 m from the walls   |

<sup>1</sup>  $\Delta T$  is calculated comparing the building surface temperature of the green wall with the surface temperature of a bare wall

<sup>2</sup> Decrease in temperature related to the nightly hours

<sup>3</sup> Near-façade (< 3 m) difference in air temperature

<sup>4</sup> Temperature related to 1 m from the pedestrian level

<sup>5</sup> Boxes containing plants are placed at different heights on the wall

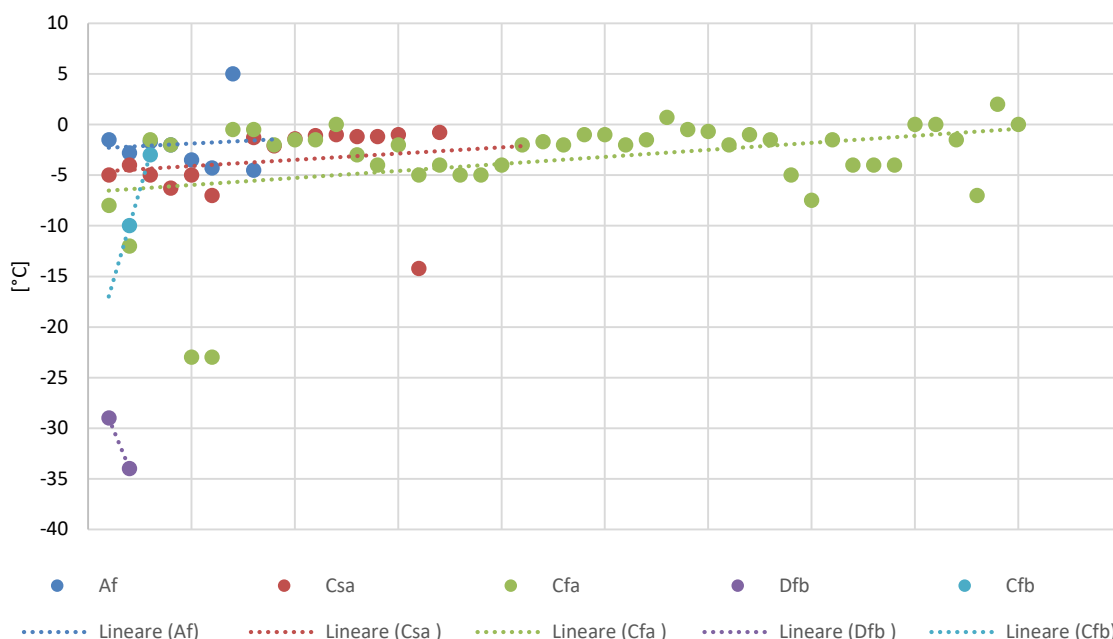
<sup>6</sup> Living wall with substrate constituted by fibers, perlite, and volcanic ash

<sup>7</sup> Surface temperature of the façade behind the green façade

<sup>8</sup> At 1.5 m above the ground

<sup>9</sup> Maximum difference in nightly temperature. Calculated averaging the differences in max temperatures

Le differenze tra le temperature superficiali sulle pareti verdi e quelle sulle pareti nude sono state riportate in un grafico a dispersione (Figura 17) nel quale i diversi valori ottenuti dalla revisione della letteratura sono stati raggruppati a seconda delle aree climatiche.



**Figura 17. Differenza tra le temperature superficiali diurne di una parete nuda e una parete con verde verticale**

Per l'area climatica equatoriale umida (Af), si nota che l'installazione delle pareti verdi comporta, nella maggior parte dei casi di studio revisionati, una diminuzione della temperatura diurna superficiale che va 1.5 a 4.5 °C. Solo in un caso di studio, si è osservato in corrispondenza della modellazione di una parete orientata a Est, in condizioni di alta radiazione solare, una temperatura superficiale, nel caso della parete verde, superiore di 5 °C rispetto ad una parete nuda. L'anomalia rilevata verrà investigata in futuro per poterne capire la motivazione.

Per l'area climatica temperata calda con estati molto calde e secche (Csa), tutti i casi di studio revisionati mostrano, in modo concorde, che l'installazione delle pareti verdi comporta una diminuzione della temperatura superficiale diurna della parete verde in confronto alla corrispondente parete nuda (Figura 17). La diminuzione della temperatura è contenuta in un intervallo che va da circa 1 °C a circa 14 °C. Un intervallo così ampio dipende principalmente dall'orientamento delle pareti verdi oggetto di studio e dalla stagione in cui le temperature sono state considerate. Ad esempio, in autunno e in inverno la temperatura delle pareti verdi è più bassa della temperatura sulle pareti nude di circa 1 °C. Mentre, durante la stagione calda, tale diminuzione varia tra i 4 e i 14 °C, con la diminuzione massima corrispondente ad un living wall orientato verso Ovest.

Nell'area climatica temperata calda umida con estati molto calde (Cfa), i casi di studi mostrano che le pareti verdi diminuiscono la temperatura superficiale diurna fino ad un massimo di 23 °C. In particolare, la massima diminuzione nella temperatura superficiale (i.e., 23 °C) può essere trovata durante l'estate nei casi di studio in cui le pareti verdi sono orientate verso Sud e installate a Torino. Mentre, per i rimanenti casi di studio, la diminuzione della temperatura superficiale è compresa nell'intervallo 0÷7.5 °C. In questo intervallo, la più alta diminuzione di temperatura è stata registrata in estate su pareti verdi esposte a Nord e durante giorni di pioggia. In modo analogo, le pareti verdi orientate verso Sud mostrano la massima differenza di temperatura durante i giorni di pioggia piuttosto che durante i giorni di sole.

Per l'area climatica temperata umida con estati calde (Cfb) è stato trovato un solo articolo scientifico nel quale sono presentati due casi di studio circa gli effetti sulla temperatura superficiale diurna dell'installazione di pareti verdi. In particolare, i due casi di studio mostrano una diminuzione della temperatura superficiale

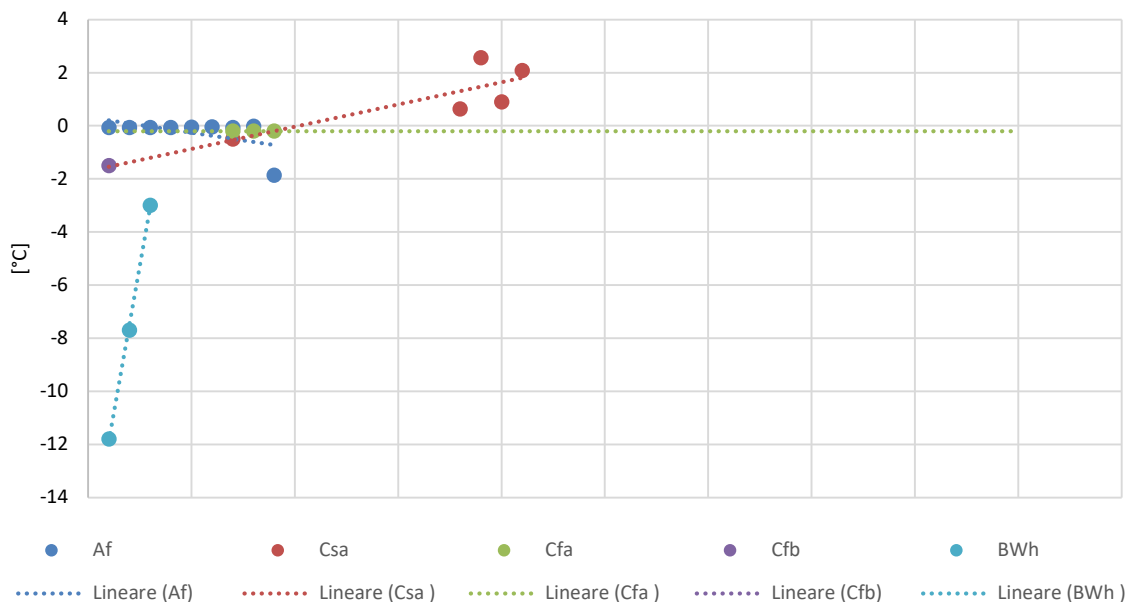
Per l'area climatica temperata calda umida con estati molto calde (Cfa) non si è trovata alcuna variazione nella temperatura superficiale notturna tra pareti verdi a pareti nude nella maggior parte dei casi di studio revisionati. Tuttavia, alcuni casi di studio mostrano una diminuzione nella temperatura superficiale notturna fino ad un valore massimo di 5 °C. Solamente in due casi di studio si è trovato, in giorni estivi piovosi o nuvolosi, un aumento della temperatura fino ad un massimo di 2 °C per facciate verdi orientate verso Est rivestite dalla specie vegetale *Bauhinia corymbosa*.



36

statisticamente rilevanti. Quindi, nella prossima annualità verrà esteso il numero di articoli scientifici revisionati.

Inoltre, sono state analizzate le differenze diurne di temperature dell'aria in prossimità di una parete nuda e di una parete verde (Figura 19) e sono stati raggruppati i valori delle differenze di temperatura a seconda delle aree climatiche.



**Figura 19. Differenza tra le temperature dell'aria diurne in prossimità di una parete nuda e di una parete con verde verticale**

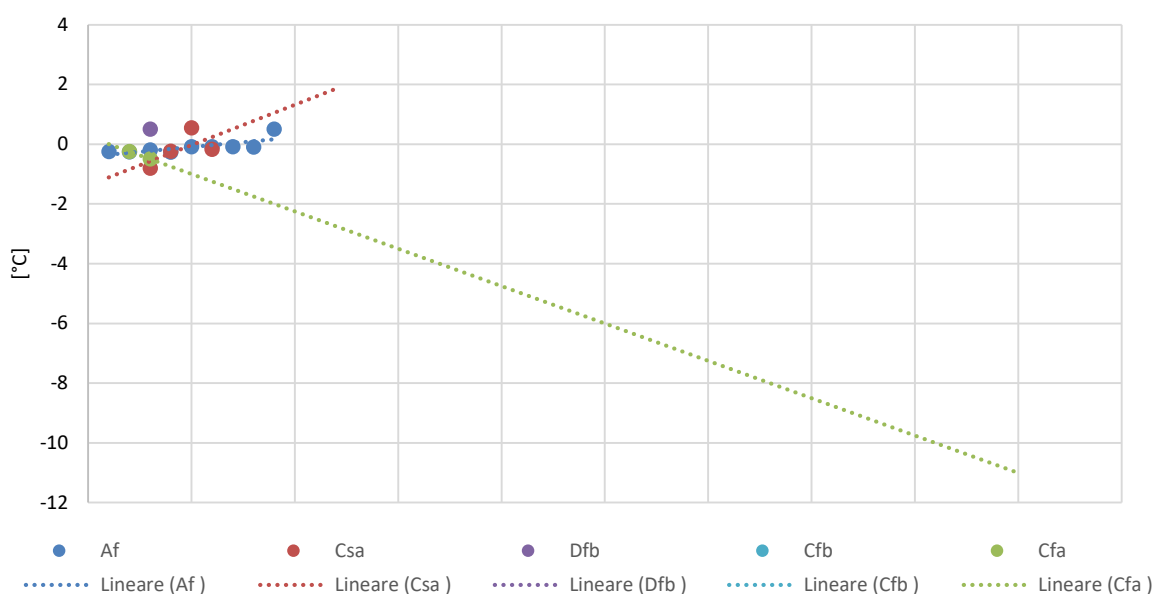
I dati in Figura 19 mostrano che per le aree climatiche equatoriali umide (Af), le temperature dell'aria in prossimità delle pareti verdi sono, nella maggior parte dei casi di studio esaminati, molto simili alle temperature dell'aria in corrispondenza di pareti nude. La differenza, indipendentemente dall'orientamento delle stesse pareti verdi, si aggira intorno ai  $-0.07\text{ }^{\circ}\text{C}$ , ed è pertanto trascurabile. Un solo caso di studio riporta un decremento della temperatura dell'aria pari a circa  $1.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ . La differenza tra i valori osservati nasce dal fatto che la maggior diminuzione di temperatura fa riferimento ad un caso di studio in cui l'installazione delle pareti verdi viene estesa all'intera città. Al contrario, gli altri casi di studio riportano dati riferibili all'effetto di una singola parete. Sono state analizzate anche le differenze di temperature diurne dell'aria anche per l'area climatica calda temperata con estati molto calde e secche (Csa); i casi di studio hanno evidenziato due comportamenti distinti: quattro casi di studio riportano un aumento della temperatura dell'aria in prossimità delle pareti verdi; un caso di studio riporta una diminuzione di temperatura pari a circa  $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Le due tendenze di temperatura fanno riferimento a due distinti articoli scientifici. Nel primo, ovvero nell'articolo che riporta un aumento della temperatura dell'aria, viene monitorata una facciata verde esposta ad Ovest e viene considerata la temperatura dell'aria sia durante la stagione calda sia durante la stagione fredda. Durante la stagione calda, si registra un aumento della temperatura dell'aria che varia tra circa  $0.6$  e  $0.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ , rispettivamente a  $0.5\text{ m}$  e a un metro dalla parete verde. Mentre, in inverno, in corrispondenza della stessa parete si registra un aumento della temperatura dell'aria che varia dai circa  $2.6\text{ }^{\circ}\text{C}$  ai circa  $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ , rispettivamente a  $0.5\text{ m}$  e a un metro dalla parete verde. Al contrario, un altro caso di studio riferito alla stessa area climatica mostra una diminuzione della temperatura dell'aria pari a  $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ . La differenza principale tra i due studi (ovvero quello che riporta un aumento della temperatura dell'aria e quello che riporta una diminuzione della stessa) risiede sia nell'orientamento delle pareti, ovvero, Ovest nel primo caso ed Est nel secondo caso, ma anche, e soprattutto, nel fatto che nel secondo caso la modellazione è estesa ad un'intera strada piuttosto che ad una sola parete. Un'analisi dei casi di studio riferiti ad un'area climatica calda temperata umida con estati molto calde (Cfa), mostra che l'installazione di diverse tipologie di pareti verdi determina, in tutti i casi, una diminuzione della temperatura dell'aria in prossimità della parete stessa pari a  $0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$  rispetto alla temperatura dell'aria in prossimità di una parete nuda. Per l'area climatica con clima caldo temperato umido con estati calde (Cfb) sono stati trovati solo due studi che fanno riferimento alla stessa

parete sperimentale esposta ad Ovest. I monitoraggi di questa parete mostrano che in prossimità della parete la temperatura dell'aria è di circa 1.5 °C inferiore rispetto alla temperatura dell'aria in corrispondenza della parete nuda. Questo dato, se pure interessante, non può essere considerato significativo perché fa riferimento ad un unico studio.

Una parete verde è stata modellata anche per valutare l'effetto della stessa sulla temperatura dell'aria nell'area climatica desertica arida (BWh). I risultati hanno mostrato che l'installazione di pareti verdi può ridurre la temperatura dell'aria da un minimo di 3 °C fino a circa 12 °C. La differenza nella riduzione della temperatura dell'aria dipende dalla scala di applicazione delle pareti verdi. Infatti, la minore riduzione di temperatura viene ottenuta considerando l'esposizione a Nord delle pareti verdi disposte lungo una intera strada. Invece, la riduzione di circa 12 °C è ottenuta considerando l'installazione di pareti verdi alla scala di un intero isolato urbano.

Per quel che riguarda, invece, l'effetto sulle temperature notturne dell'installazione di verde verticale, i casi di studio nella letteratura revisionata sono stati suddivisi per aree climatiche omogenee. Si è visto che i casi di studio non sono distribuiti uniformemente per aree climatiche. In particolare, per alcune aree climatiche (i.e., Csa, Dfb e Cfa) il numero di casi di studio non è statisticamente significativo. Pertanto, il comportamento delle pareti verdi non è generalizzabile per l'intera area climatica, ma è rappresentativo del solo caso di studio.

Per l'area climatica equatoriale umida (Af), si è trovato che l'installazione di pareti verdi determina una diminuzione della temperatura notturna dell'aria in prossimità della parete verde che va da 0.1 a 0.3 °C. Una maggiore temperatura dell'aria può essere osservata quando la radiazione solare diurna è bassa. Un solo caso di studio ha evidenziato un aumento della temperatura notturna dell'aria pari a 0.5 °C. Tuttavia, quest'ultimo caso di studio, contrariamente agli altri esaminati, riporta i dati relativi ad una modellazione che prevede l'installazione di pareti verdi estesa all'intera area urbana (Figura 20).



**Figura 20. Differenza tra le temperature dell'aria notturne in prossimità di una parete nuda e di una parete con verde verticale**

Figura 20 mostra, inoltre, che nell'area climatica calda e temperata con estati calde e secche (Csa), l'installazione di living wall provoca una diminuzione della temperatura dell'aria maggiore durante la stagione calda rispetto alla stagione fredda. Il caso di studio mostra come con l'aumentare della distanza dalla parete verde l'effetto della mitigazione dell'isola di calore diminuisca. Bisogna, tuttavia, sottolineare che i risultati trovati fanno riferimento ad un solo articolo scientifico che riporta quattro modellazioni. Pertanto, i risultati così trovati dovranno essere confrontati, nei prossimi mesi, con i risultati derivanti da altri studi.

In modo del tutto simile, per la zona climatica nevosa e umida con estati calde (Dfb), è stato trovato un solo studio pubblicato negli ultimi cinque anni che rispondesse ai criteri di scelta degli articoli scientifici da revisionare. Tale studio mostra che in prossimità di una facciata verde esposta ad Ovest, la temperatura dell'aria durante la notte è più alta rispetto alla temperatura dell'aria in corrispondenza di un muro nudo.

Per le aree geografiche con clima caldo temperato umido e con estati molto calde (Cfa) sono stati trovati solo due casi di studio che indagano gli effetti delle pareti verdi sulla temperatura dell'aria e che mostrano una diminuzione della temperatura dell'aria variabile tra 0.25 e 0.5 °C. Tuttavia, anche in questo caso il numero dei casi di studio non è statisticamente significativo da poter estrarre un comportamento ricorrente. Pertanto, un maggiore numero di studi verrà revisionato durante la prossima annualità in modo da poter estrarre informazioni generalizzabili.

### 2.3. Analisi delle tipologie edilizie più frequenti sul territorio Italiano

Al fine di individuare alcuni edifici tipo che possano essere considerati significativi del patrimonio immobiliare italiano, sono stati interrogati gli studi prodotti da ENEA e CRESME tra il 2009 e il 2012 (42) e da due progetti Europei: Tabula (43) e Episcopo (44).

L'analisi dei dati ha mostrato la presenza di circa 12 milioni di edifici residenziali sul territorio nazionale, per un totale di oltre 30 milioni di abitazioni, di cui oltre il 30% concentrato nelle prime dieci aree provinciali (i.e., Roma, Milano, Torino, Napoli, Bari, Palermo, Brescia, Bergamo, Catania e Genova) e circa il 20% nelle sole prime quattro Città Metropolitane.

Il 43% degli edifici residenziali è completamente isolato sui quattro lati, mentre, il 19% presenta un solo lato di contiguità e 38% ha almeno due lati in condivisione con altri edifici. Le tipologie edilizie si presentano molto distribuite: la più frequente è la monofamiliare (26%), seguita dalla piccola palazzina (21%), gli edifici plurifamiliari a torre costituiscono il 18% del totale e quelli in linea il 15%. Appare importante la presenza dell'11% di edifici plurifamiliari realizzati per contiguità e dell'8% circa di case a schiera.

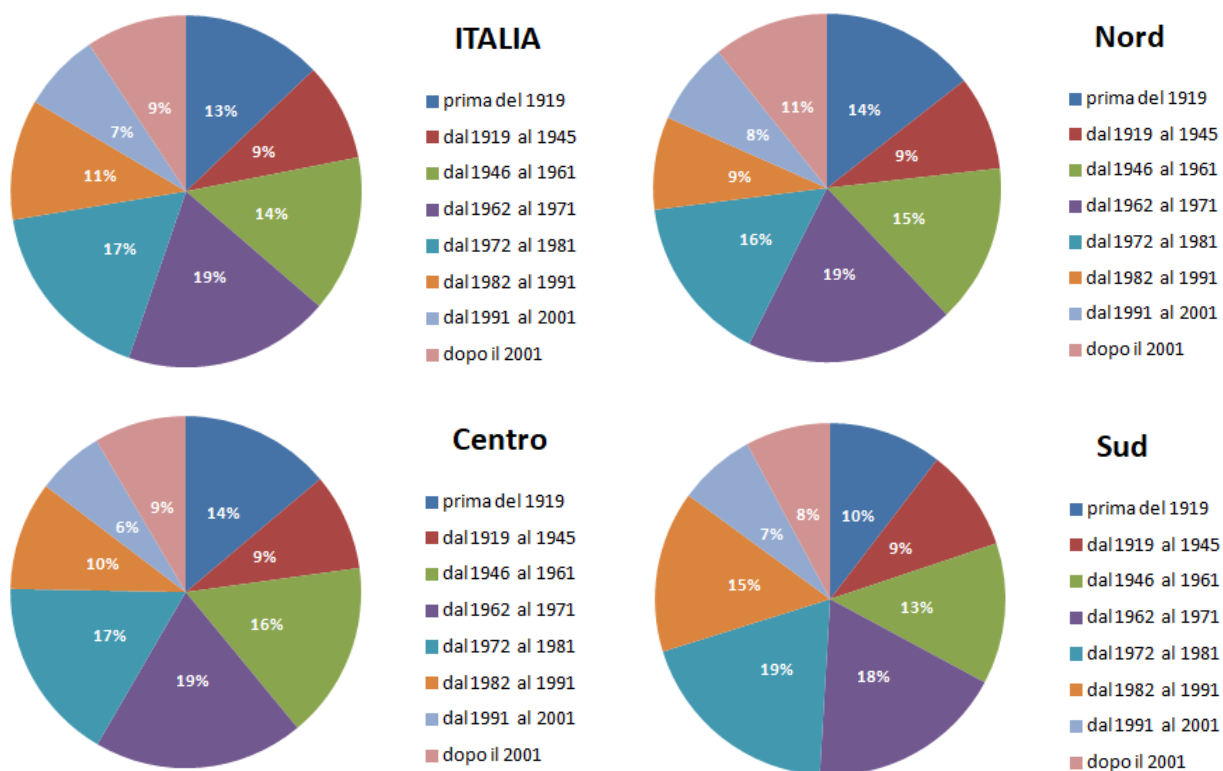


Figura 21. Distribuzione abitazioni per anno di costruzione

In Figura 21 sono il patrimonio residenziale italiano è stato discretizzato per periodo di costruzione. Si osserva che a livello nazionale il 55% degli edifici residenziali è stato costruito prima del 1972, quindi prima dell'adozione a livello nazionale della primo provvedimento legislativo italiano inerente il risparmio energetico degli edifici (i.e., L 373/1976) (45). Circa il 16% degli edifici residenziali è stato costruito a partire dal 1992, quindi successivamente all'emanazione del secondo ed importante provvedimento legislativo sul risparmio energetico degli edifici (L 10/1991) (46). Il rimanente 29% del parco immobiliare residenziale italiano è stato costruito tra il 1972 ed il 1991. Tali proporzioni variano tra Nord, Centro e Sud: al Nord il 57% degli edifici è stato costruito prima del 1972, il 24% tra il 1972 ed il 1991, ed il 19% dopo il 1991; al Centro gli edifici costruiti sino al 1971 sono il 58%, quelli tra il 1972 e il 1991 sono il 27%, e quelli successivi al 1991 sono il 15%; al Sud il 50% degli edifici risale ad un'epoca anteriore al 1972, il 35% è stato costruito tra 1972 e 1991, ed il 15% è successivo al 1991.

Il 94% delle abitazioni è dotata di impianto fisso di riscaldamento e il 31% anche o solo di impianto di raffrescamento, anche se questo dato impiantistico potrebbe risultare facilmente obsoleto essendo su una base di dati del 2011.

A livello quantitativo, i dati statistici sono forniti su base regionale, per alcuni anche provinciale. Questi dati comprendono:

- il numero di abitazioni suddivisi per tipologia di edificio (secondo le categorie mono- bi familiari, tri-quadri familiari, plurifamiliari);
- il numero di abitazioni e il numero di edifici suddivisi per periodo di costruzione;
- il numero di edifici suddiviso per numero di abitazioni contenute nell'edificio, secondo le categorie mono-bi familiari, tri - quadri familiari, plurifamiliari;
- il numero di abitazioni e il numero di edifici per zone climatiche (come definite ai sensi del D.P.R. 412/93 (47)).

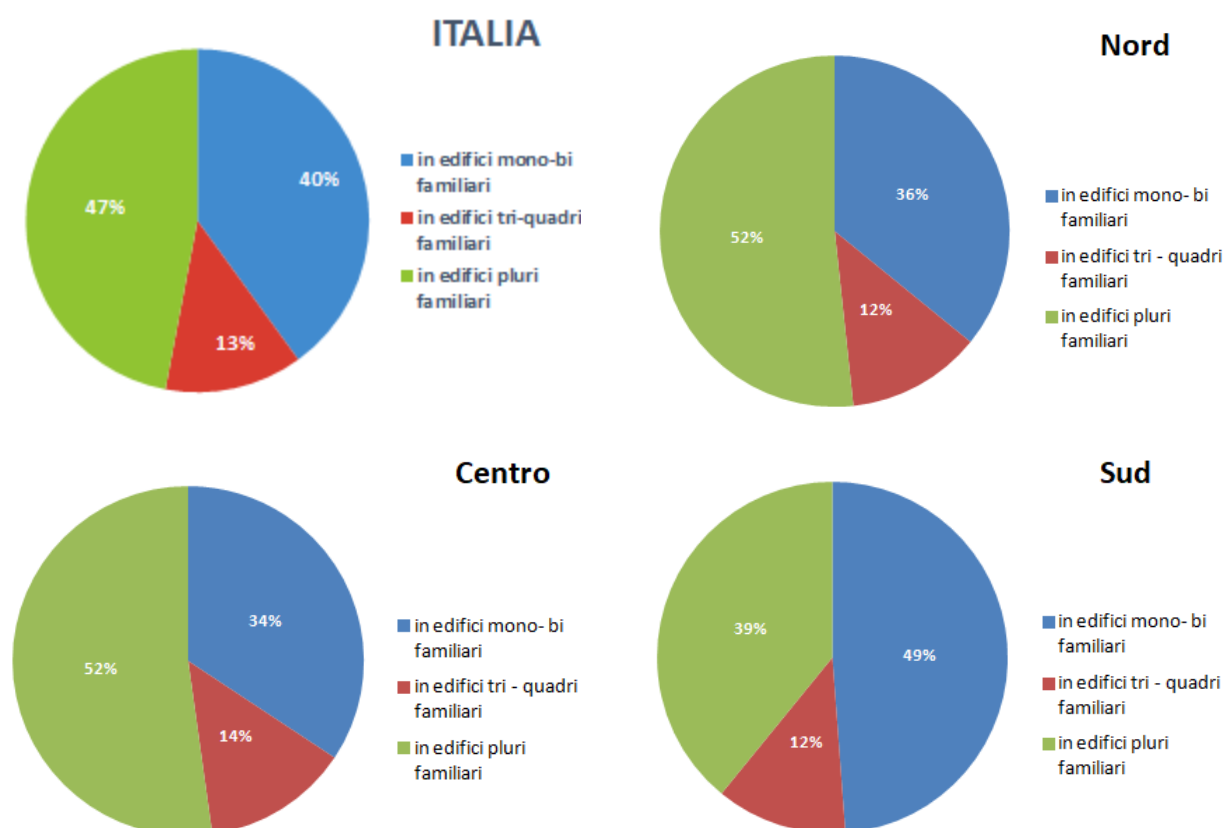


Figura 22. Distribuzione abitazione per tipologia di edificio



Sulle specifiche delle tipologie costruttive più diffuse, i dati, molto articolati, sono forniti su scala macro-regionale (Nord, Centro, Sud). Per quanto concerne la tipologia di edificio, la maggior parte delle abitazioni si trova in edifici plurifamiliari, tranne che al Sud (e isole) dove la percentuale maggiore è costituita da edifici mono o bifamiliari, come mostrato in Figura 22.

Tabella 4, Tabella 5 e Tabella 6 riportano per ciascuna area geografica e per diverse epoche di costruzione le più frequenti caratteristiche morfologiche, costruttive e conservative degli edifici.

**Tabella 4. Caratterizzazione dell'edificio residenziale tipo per il nord Italia**

| <b>NORD</b>                                                                   |                          |                          |                                   |
|-------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|--------------------------|-----------------------------------|
| <b>Periodo di costruzione</b>                                                 | Ante 1970                | 1970 - 1980              | Post 1980                         |
| <b>Contiguità</b>                                                             | Fabbricati isolati (62%) | Fabbricati isolati (70%) | Fabbricati isolati (48%)          |
| <b>Sistema costruttivo</b>                                                    | Muratura portante (73%)  | Muratura portante (41%)  | Calcestruzzo armato in sito (48%) |
| <b>Livelli fuori terra</b>                                                    | 2 piani (60%)            | 2 piani (55%)            | 2 piani (65%)                     |
| <b>Stato di conservazione</b>                                                 | Buono o ottimo (71%)     | Buono o ottimo (81%)     | Buono o ottimo (90%)              |
| <b>Piano terra o interrato a uso non residenziale</b>                         | Terra (41%)              | Terra (46%)              | Terra (47%)                       |
| <b>Edificio tipo (rif. Error. L'origine riferimento non è stata trovata.)</b> | 1                        | 2                        | 3                                 |

**Tabella 5. Caratterizzazione dell'edificio residenziale tipo per il centro Italia**

| <b>CENTRO</b>                                                                 |                          |                          |                                   |
|-------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|--------------------------|-----------------------------------|
| <b>Periodo di costruzione</b>                                                 | Ante 1970                | 1970 - 1980              | Post 1980                         |
| <b>Contiguità</b>                                                             | Fabbricati isolati (58%) | Fabbricati isolati (73%) | Fabbricati isolati (51%)          |
| <b>Sistema costruttivo</b>                                                    | Muratura portante (79%)  | Muratura portante (48%)  | Calcestruzzo armato in sito (52%) |
| <b>Livelli fuori terra</b>                                                    | 2 piani (57%)            | 2 piani (47%)            | 2 piani (54%)                     |
| <b>Stato di conservazione</b>                                                 | Buono o ottimo (70%)     | Buono o ottimo (66%)     | Buono o ottimo (95%)              |
| <b>Piano terra o interrato a uso non residenziale</b>                         | Non presente (51%)       | Terra (46%)              | Non presente (48%)                |
| <b>Edificio tipo (rif. Error. L'origine riferimento non è stata trovata.)</b> | 1                        | 2                        | 3                                 |

**Tabella 6. Caratterizzazione dell'edificio residenziale tipo per il sud Italia**

| <b>SUD</b>                                                                    |                                             |                                   |                                   |
|-------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| <b>Periodo di costruzione</b>                                                 | Ante 1970                                   | 1970 - 1980                       | Post 1980                         |
| <b>Contiguità</b>                                                             | Fabbricati contigui su due o più lati (38%) | Fabbricati isolati (42%)          | Fabbricati isolati (54%)          |
| <b>Sistema costruttivo</b>                                                    | Muratura portante (77%)                     | Calcestruzzo armato in sito (44%) | Calcestruzzo armato in sito (59%) |
| <b>Livelli fuori terra</b>                                                    | 2 piani (62%)                               | 2 piani (56%)                     | 2 piani (49%)                     |
| <b>Stato di conservazione</b>                                                 | Buono o ottimo (60%)                        | Buono o ottimo (68%)              | Buono o ottimo (79%)              |
| <b>Piano terra o interrato a uso non residenziale</b>                         | Non presente (54%)                          | Non presente (44%)                | Terra (43%)                       |
| <b>Edificio tipo (rif. Error. L'origine riferimento non è stata trovata.)</b> | 4                                           | 5                                 | 6                                 |

In termini qualitativi, un avanzamento molto significativo è stato apportato dal progetto europeo Tabula (43) e dal successivo Episcopo (44), realizzati in Italia dal Politecnico di Torino.

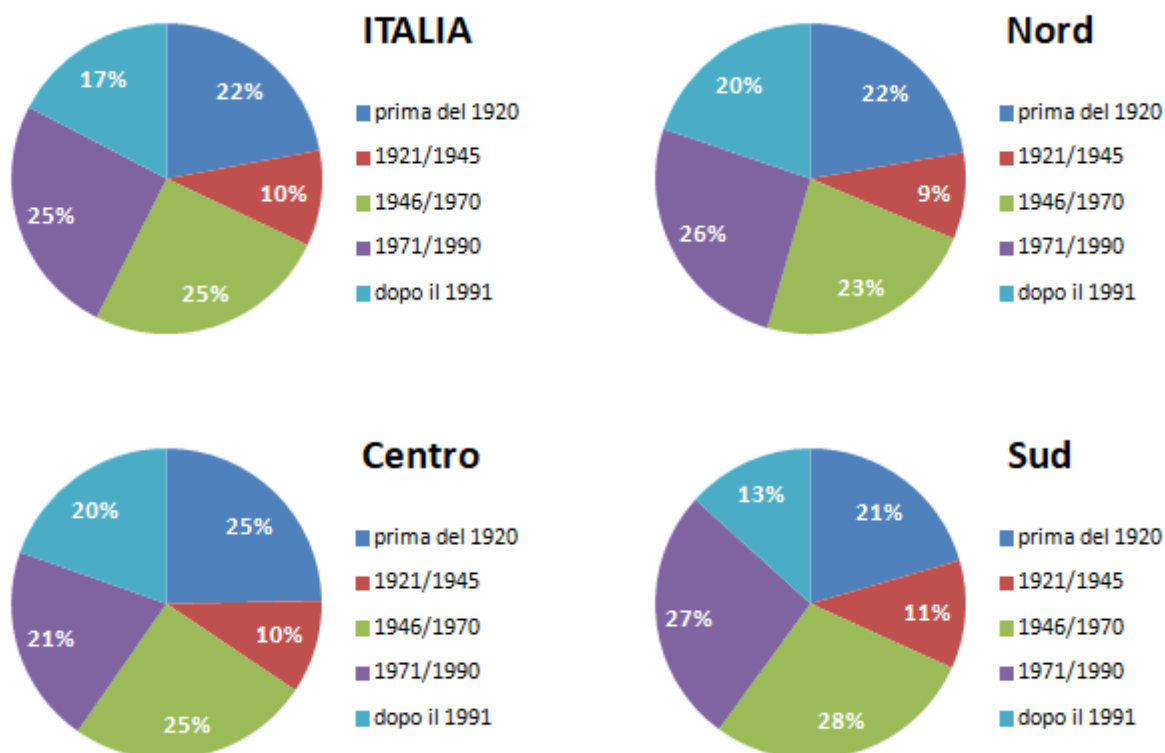
In Tabella 7 è presentata una sintesi delle principali caratteristiche di edifici residenziali tipo, realizzata a partire dalla “Matrice della Tipologia Edilizia” italiana (48), riferita ad una “fascia climatica media” (in Italia corrispondente alla fascia E, tra 2101 a 3000 GG).

**Tabella 7. Scheda caratterizzazione edificio residenziale tipo (elaborazione su dati Tabula/Episcope)**

| # | Edificio                       |                                    |                                    |                        |          |                 | Superfici opache                              |                                            |                                                      |                                                      | Serramenti                          |                |
|---|--------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------|----------|-----------------|-----------------------------------------------|--------------------------------------------|------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|-------------------------------------|----------------|
|   | Volume lordo [m <sup>3</sup> ] | Superficie utile [m <sup>2</sup> ] | Superficie lorda [m <sup>2</sup> ] | S/V [m <sup>-1</sup> ] | n. piani | n. appartamenti | Trasmittanza copertura [W/(m <sup>2</sup> K)] | Trasmittanza parete [W/(m <sup>2</sup> K)] | Trasmittanza solaio superiore [W/(m <sup>2</sup> K)] | Trasmittanza solaio inferiore [W/(m <sup>2</sup> K)] | Trasmittanza [W/(m <sup>2</sup> K)] | Fattore solare |
| 1 | 3076                           |                                    | 961                                | 0.51                   | 3        | 12              | 1.8                                           | 1.7                                        | 1.65                                                 | 1.3                                                  | 4.9                                 | 0.85           |
| 2 | 4136                           |                                    | 1209                               | 0.48                   | 3        | 12              | 2.2                                           | 0.8                                        | 0.97                                                 | 1.12                                                 | 3.7                                 | 0.75           |
| 3 | 3526                           |                                    | 1120                               | 0.54                   | 3        | 15              | 2.2                                           | 0.59                                       | 0.69                                                 | 0.86                                                 | 2.2                                 | 0.67           |
| 4 | 725                            | 199                                |                                    | 0.72                   | 2        | 1               | 1.14                                          | 0.76                                       |                                                      | 0.99                                                 | 2.6                                 | 0.75           |
| 5 | 605                            | 172                                |                                    | 0.73                   | 2        | 1               | 2.2                                           | 0.59                                       | 0.69                                                 | 0.77                                                 | 2.8                                 | 0.75           |
| 6 | 400                            | 111                                |                                    | 0.51                   | 2        | 1               | 2.2                                           | 1.15                                       |                                                      | 1.3                                                  | 4.9                                 | 0.85           |

Relativamente agli edifici adibiti ad uso ufficio, i modelli di riferimento sono stati definiti sulla base delle informazioni estrapolate dall’indagine effettuata da CRESME per ENEA e pubblicate nel Report RSE/2009/164 (49), in cui sono conteggiati poco meno di 65000 edifici ad uso esclusivo o prevalente uso ufficio distribuiti sul territorio nazionale. Il 30% di tali edifici è concentrato nelle prime 12 province per numero di edifici ad uso ufficio, di cui le prime tre sono Roma, Milano e Torino.

Figura 23 presenta una prima classificazione, relativa al periodo di costruzione, dalla quale si evidenzia una distribuzione alquanto uniforme a livello nazionale. Si osserva inoltre che circa un terzo del totale degli edifici uso ufficio è stata costruita prima del 1945, con un tasso di rinnovo (i.e., costruzioni successive al 1990) del parco immobiliare più elevato rispetto al caso residenziale.



**Figura 23. Distribuzione edifici ad uso uffici per anno di costruzione**

**Tabella 8. Caratterizzazione tipologica degli edifici ad uso ufficio in Italia (elaborazioni su dati CRESME)**

|                                                          | Ante 1920                      | 1920/1945                      | 1946/1971                      | 1972/1991                      | 1992/2011                      |
|----------------------------------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| <b>Tipologia edilizia</b>                                | Murature e calcestruzzo armato | Murature e calcestruzzo armato | Murature e calcestruzzo armato | Murature e calcestruzzo armato | Murature e calcestruzzo armato |
| <b>N° piani ft</b>                                       | 2                              | 2                              | 2                              | 2                              | 2                              |
| <b>Superficie riscaldata [m<sup>2</sup>]</b>             | 216                            | 216                            | 216                            | 216                            | 216                            |
| <b>Volume [m<sup>3</sup>]</b>                            | 1469                           | 1426                           | 1339                           | 1296                           | 1253                           |
| <b>S/V [m<sup>-1</sup>]</b>                              | 0.29                           | 0.3                            | 0.32                           | 0.33                           | 0.34                           |
| <b>Trasmittanza parete esterna W/(m<sup>2</sup> K)</b>   | 1.169                          | 1.169                          | 1.169                          | 0.761                          | 0.761                          |
| <b>Trasmittanza solaio inferiore W/(m<sup>2</sup> K)</b> | 0.806                          | 0.806                          | 0.806                          | 0.516                          | 0.516                          |
| <b>Trasmittanza solaio superiore W/(m<sup>2</sup> K)</b> | 1.322                          | 1.322                          | 1.322                          | 0.828                          | 0.828                          |

In Tabella 8 sono mostrate le elaborazioni per una prima caratterizzazione tipologica e dimensionale di edifici tipo ad uso ufficio.

Un primo elemento di rilievo emerge dal dato che, quantomeno ad una analisi preliminare, le caratteristiche dimensionali risultano omogenee in tutta Italia, senza evidenti differenze regionali.

#### *2.4. Strumento di calcolo per la stima degli effetti della mitigazione dell'isola di calore urbana sul consumo energetico degli edifici*

Per il calcolo degli effetti della mitigazione dell'isola di calore urbana sul consumo energetico degli edifici sono state prese in considerazione alcune soluzioni di strumenti di calcolo disponibili sia sul mercato, sia tra gli strumenti sviluppati nel corso delle passate annualità della Ricerca di Sistema Elettrico, internamente ad ENEA o da Università co-beneficiarie.

Una soluzione ampiamente diffusa è rappresentata dall'utilizzo di strumenti di calcolo basati sul software libero ENERGY PLUS® (50), del Department of Energy (DOE), degli USA, che implementa il metodo Transfer Function (Method TFM) con numerose caratteristiche (quali l'interazione edificio-impianto e i profili d'uso) che lo rendono un software di riferimento. ENERGY PLUS è usualmente utilizzato da software house commerciali come motore di calcolo, a cui sono affiancati moduli di pre-processing e di post-processing sviluppati appositamente per lo strumento commerciale, quale, ad esempio, DESIGNBUILDER®. Pur essendo ENERGY PLUS un software di riferimento, esso necessita, per un suo corretto utilizzo, di dati di input, riguardanti sia gli aspetti dimensionali e termofisici degli edifici, sia gli aspetti impiantistici e di occupazione, estremamente dettagliati.

Un secondo strumento considerato, è stato il codice ODESSE, sviluppato da ENEA nell'ambito della Ricerca di Sistema Elettrico (51,52). Il codice ODESSE implementa il metodo Heat Balance (HB), che gli consente di effettuare un calcolo in transitorio termico della risposta dell'edificio. È un codice però che richiede in ingente impegno computazionale legato ai tempi di simulazione.

Un terzo strumento di calcolo che è stato preso in considerazione e che si è deciso di utilizzare per stimare gli effetti della mitigazione dell'isola di calore urbana sul consumo energetico degli edifici, è un software sviluppato per ENEA dall'Università degli Studi di Catania nel corso del PAR 2012-14, descritto brevemente in seguito (per una descrizione dettagliata vedere (53)) e modificato da ENEA nel corso del PAR 2015 (54). Il software è utilizzabile anche in presenza di dati input sul sistema edificio-impianto e sui suoi profili di utilizzo semplificati, non presenta tempi di simulazione ingenti e allo stesso tempo si avvale dell'implementazione di un metodo di calcolo che, seppur semplificato, consente una simulazione di tipo dinamico dell'edificio: tali caratteristiche sono alla base della sua scelta quale strumento di calcolo per la stima degli effetti della mitigazione dell'isola di calore urbana sul consumo energetico degli edifici

Il software è basato sull'implementazione del modello di simulazione proposto dalla Norma Internazionale UNI EN 13790:2008 (55). Si tratta del modello dinamico semplificato a cinque resistenze ed una capacità

(R5C1), che consente un calcolo dei consumi energetici orari per un “giorno medio” di ciascun mese e rappresenta una procedura rapida per la valutazione dell’energia primaria per il riscaldamento e per il raffrescamento estivo.

Lo schema del modello è riportato in Figura 24. Il modello R5C1, fra i tanti presenti in letteratura (come evidenziato in (53)), risulta mediamente complesso presentando sia le conduttanze termiche che la capacità termica dell’edificio.

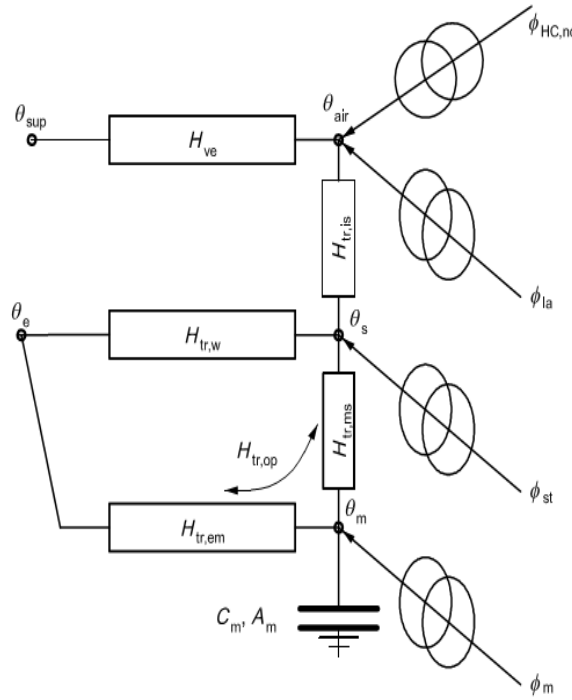


Figura 24. Schema modello R5C1. Immagine modificata da (55)

I nodi rappresentano le temperature dell’aria di ventilazione ( $\theta_{sup}$ ), esterna ( $\theta_e$ ), della massa ( $\theta_m$ ), della superficie dell’involucro rivolta verso l’ambiente interno ( $\theta_s$ ), e dell’aria interna ( $\theta_{air}$ ). Le conduttanze termiche sono: la conduttanza di ventilazione ( $H_{ve}$ ), la conduttanza di trasmissione per le pareti vetrate ( $H_{tr,w}$ ), la conduttanza di trasmissione per le pareti opache verso la massa delle pareti ( $H_{tr,em}$ ), la conduttanza di trasmissione per le pareti opache verso la superficie delle pareti, la conduttanza di trasmissione radiativa fra la superficie delle pareti e l’aria interna. I flussi termici sono: flusso termico verso la massa delle pareti ( $\phi_m$ ), il flusso termico verso la superficie delle pareti ( $\phi_{st}$ ), il flusso termico interno all’edificio ( $\phi_{ia}$ ), ed il flusso termico scambiato ( $\phi_{HC,nd}$ ).

La Norma UNI EN ISO 13790 (55) definisce in modo univoco le conduttanze termiche e propone una modalità di soluzione riferita alle condizioni medie mensili giornaliere e alle condizioni medio orarie giornaliere mensili. La soluzione diretta porta a calcolare, fissate le temperature e le conduttanze termiche, il flusso netto scambiato,  $\phi_{HC,nd}$ , al variare delle condizioni climatiche. Tale soluzione comporta la soluzione di un’equazione differenziale relativa al bilancio termico al nodo  $\theta_m$ :

$$C_m \frac{d\theta_m}{dt} + \left( H_{tr,em} + H_{tr,ms} - H_{tr,ms} \cdot \frac{H_{tr,ms}}{H_{tr,w} + H_{tr,ms} + H_{tr,is}} \right) \cdot \theta_m =$$

$$= \phi_m + H_{tr,em} \cdot \theta_e + H_{tr,ms} \cdot \frac{\phi_{st} + H_{tr,w} \cdot \theta_e + H_{tr,is} \cdot \theta_{air}}{H_{tr,w} + H_{tr,ms} + H_{tr,is}}$$

Il flusso netto scambiato è calcolato come:

$$\phi_{HC,nd} = H_{ve} \cdot (\theta_{air} - \theta_{sup}) + H_{tr,is} \cdot (\theta_{air} - \theta_s) - \phi_{ia}$$

La soluzione ricorsiva, basata sul metodo di Heun, è data dalla seguente equazione:

$$\theta_m(t_{n+1}) = \left(1 - \lambda \cdot \frac{\theta}{2}\right) \cdot \theta_m(t_n) + \frac{\theta}{2} \cdot (-\lambda \cdot \theta_m(t_n) + g(t_n)) + \frac{\theta}{2} \cdot g(t_{n+1})$$

dove:

$$\lambda = \frac{H_{tr,em} + H_{tr,ms} - H_{tr,ms} \cdot \frac{H_{tr,ms}}{H_{tr,w} + H_{tr,ms} + H_{tr,is}}}{C_m}$$

$$g = \frac{\phi_m + H_{tr,em} \cdot \theta_e + H_{tr,ms} \cdot \frac{\phi_{st} + H_{tr,w} \cdot \theta_e + H_{tr,is} \cdot \theta_{air}}{H_{tr,w} + H_{tr,ms} + H_{tr,is}}}{C_m}$$

Il calcolo così predisposto risulta sufficientemente rapido ed è stato implementato su foglio di calcolo Excel.

Il modello è in grado di simulare un edificio composto da un'unica zona termica delimitata da superfici verticali disperdenti, che possono essere orientate a Nord, Sud, Est, Ovest, Nord-Est, Sud-Est, Sud-Ovest e Nord-Ovest, e da superfici orizzontali dispendenti (soffitto e pavimento). Per ciascun orientamento verticale si possono presentare una superficie disperdente opaca ed una superficie disperdente trasparente.

I dati di input necessari al modello sono:

- la trasmittanza termica di ciascun elemento disperdente [W/(m²K)];
- il fattore di partecipazione (previsto dalla UNI EN 13790);
- la superficie utile totale dell'elemento [m²];
- il fattore di assorbimento solare per le pareti opache e il coefficiente di trasmissione solare globale per le superfici trasparenti;
- il fattore di shading per ciascun elemento considerato (come da norma UNI EN 13790);
- l'altezza totale della zona termica simulata [m];
- il numero di ricambi orari in condizioni di assenza di ventilazione meccanica controllata;
- la temperatura di mandata dell'aria di ventilazione nel caso di ventilazione meccanica controllata [°C];
- la temperatura ambiente che si desidera avere durante l'attenuazione notturna [°C];
- il flusso specifico nominale verso la volta celeste [W/m²];
- la temperatura di regolazione degli impianti (normalmente posta pari a 20°C nei mesi invernali e 26 °C nei mesi estivi);
- la pressione totale atmosferica per la località considerata [Bar];
- l'umidità relativa dell'aria di ventilazione [-];
- l'intensità di calore latente delle sorgenti interne [W/m²].

La schermata di inserimento dei dati di input, geometrici e termofisici dell'edificio simulato è illustrata in Figura 25.

|    | A | B           | C        | D    | E        | F          | G             | H                   | I       | J           | K                      | L                    | M     |
|----|---|-------------|----------|------|----------|------------|---------------|---------------------|---------|-------------|------------------------|----------------------|-------|
| 2  |   |             |          |      |          |            |               |                     |         |             |                        |                      |       |
| 3  |   | Parete      | U        | b.tr | S        | a o g      | Fsh           | Asol.est            | aU/he   | Aeff        | Beta                   | fkc                  | H.tr  |
| 4  |   | Nord        | 0        | 0    | 0.00     | 0.5        | 1             |                     | 0.000   | 0.00        | 1.57                   | 0.500                | 0.00  |
| 5  |   | Fin. Nord   | 0        | 0    | 0.00     | 0.7        | 0.9           |                     |         | 0.00        | 1.57                   | 0.500                | 0.00  |
| 6  |   | Sud         | 0.628    | 1    | 28.54    | 0.5        | 1             |                     | 0.013   | 0.36        | 1.57                   | 0.500                | 17.92 |
| 7  |   | Fin. Sud    | 1.656    | 1    | 6.14     | 0.7        | 0.9           |                     |         | 3.48        | 1.57                   | 0.500                | 10.17 |
| 8  |   | Est         | 0        | 0    | 0.00     | 0.5        | 1             |                     | 0.000   | 0.00        | 1.57                   | 0.500                | 0.00  |
| 9  |   | Fin. Est    | 0        | 0    | 0.00     | 0.7        | 0.9           |                     |         | 0.00        | 1.57                   | 0.500                | 0.00  |
| 10 |   | Ovest       | 0.628    | 1    | 28.54    | 0.5        | 1             |                     | 0.013   | 0.36        | 1.57                   | 0.500                | 17.92 |
| 11 |   | Fin. Ovest  | 1.656    | 1    | 6.14     | 0.7        | 0.9           |                     |         | 3.48        | 1.57                   | 0.500                | 10.17 |
| 12 |   | Nord Est    | 0        | 0    | 0.00     | 0.5        | 1             |                     | 0.000   | 0.00        | 1.57                   | 0.500                | 0.00  |
| 13 |   | Fin. NE     | 0        | 0    | 0.00     | 0.7        | 0.9           |                     |         | 0.00        | 1.57                   | 0.500                | 0.00  |
| 14 |   | Nord Ovest  | 0        | 0    | 0.00     | 0.5        | 1             |                     | 0.000   | 0.00        | 1.57                   | 0.500                | 0.00  |
| 15 |   | Fin. NW     | 0        | 0    | 0.00     | 0.7        | 0.9           |                     |         | 0.00        | 1.57                   | 0.500                | 0.00  |
| 16 |   | Sud Est     | 0        | 0    | 0.00     | 0.5        | 1             |                     | 0.000   | 0.00        | 1.57                   | 0.500                | 0.00  |
| 17 |   | Fin. SE     | 0        | 0    | 0.00     | 0.7        | 0.9           |                     |         | 0.00        | 1.57                   | 0.500                | 0.00  |
| 18 |   | Sud Ovest   | 0        | 0    | 0.00     | 0.5        | 1             |                     | 0.000   | 0.00        | 1.57                   | 0.500                | 0.00  |
| 19 |   | Fin. SW     | 0        | 0    | 0.00     | 0.7        | 0.9           |                     |         | 0.00        | 1.57                   | 0.500                | 0.00  |
| 20 |   | Pavimento   | 0        | 0    | 0.00     | 0          |               |                     | 0.000   | 0.00        | 0                      | 1.000                | 0.00  |
| 21 |   | Soffitto    | 0.528    | 1    | 111.70   | 0.6        |               |                     | 0.040   | 3.98        | 0                      | 1.000                | 58.98 |
| 22 |   | Pareti Int. |          | 0    | 0.00     | 0          |               |                     |         | 0.00        | 0                      | 1.000                | 0.00  |
| 23 |   |             |          |      |          |            |               | Asol.est/Asup.utile | #DIV/0! |             |                        |                      |       |
| 24 |   | H.altezza   | 2.7      |      |          |            |               | Giorni              | 31      |             | Azzera                 | CTRL z               |       |
| 25 |   | n.ricambi/h | 0.25     |      |          |            |               | ft.ms               | 1       |             | Esegui Multirun        | CTRL m               |       |
| 26 |   |             |          |      | G1=Hve   | 22.12      |               | Ht.ms               | 2236.33 |             | Per bilancio Sensibile | CTRL b               |       |
| 27 |   | Htot        | 115.17   |      | G2=Hw    | 20.35      |               | Ht,em               | 99.02   |             | Per bilancio Totale    | CTRL t               |       |
| 28 |   | Hw          | 20.35    |      | G3=Ht,em | 99.02      |               | ft.is               | 1       |             | Per impianti accesi    | CTRL a               | 1     |
| 29 |   | Hpar        | 94.82    |      | G4=Ht.ms | 2236.33    |               | Ht.is               | 582.28  |             | Per impianti spenti    | CTRL s               | 0     |
| 30 |   | Htr.op      | 94.82    |      | G5=Ht,is | 582.28     |               |                     |         |             |                        |                      |       |
| 31 |   | Sw          | 12.29    |      | C        | 16'219'500 |               |                     |         |             |                        |                      |       |
| 32 |   | Af          | 98.30    |      | T        | 3600       |               | VMC                 | 0       | T mandata   | 17                     | Um. Aria. Vent. Est. | 70    |
| 33 |   | At          | 168.78   |      | Am       | 245.75     |               | Port. Variab        | 0       | n.ric.var   | 1                      | Um. Aria. Vent. Inv. | 40    |
| 34 |   | Asky        | 7.66     |      | At       | 168.78     |               | Attenuazione        | 0       | Temp. Atten | 16                     | C. Lat.S.Int (W/m²)  | 2.8   |
| 35 |   | Hve         | 22.12    |      | Asky     | 7.66       |               | Coef. Sorg. Int     | 6       | [W/m²]      |                        |                      |       |
| 36 |   | Am          | 245.75   |      |          |            |               | I-sky,nom           | 36      | [W/m²]      |                        | U.R. Ar. VMC         | 80    |
| 37 |   |             |          |      |          |            |               | Temp. Aria Int      | 20      | °C          |                        | U.R. Aria Int.       | 50    |
| 38 |   |             |          |      |          |            |               | Pressione Totale    | 1       | Bar         |                        | Coeff. Infiltr. fl   | 0     |
| 39 |   | Località    | TARVISIO | F    | Mese     | 12         | Classe Edific | MEDIA               |         |             |                        |                      |       |

Figura 25. Schermata di inserimento dei dati geometrici e termofisici di input

Una caratteristica importante del metodo è la possibilità di personalizzare i vettori di input per tenere conto dei dati meteo, dei profili d'uso reali degli impianti e degli apporti interni.

I dati climatici in ingresso (temperatura, irraggiamento e umidità) devono essere orari per cui non è possibile usare quelli forniti dalle normative italiane.

Relativamente alla valutazione dell'utilizzo reale degli impianti, il modello è dotato anche di una parte di calcolo relativa alla determinazione dei fattori di riduzione per riscaldamento o raffreddamento intermittente, che riducono il fabbisogno di energia utile per riscaldamento o per raffreddamento (così come definite nella norma UNI TS 11300-1/2014 (56)) di un edificio o abitazione in funzione delle ore di accensione degli impianti e che consentono quindi di passare ad una modalità di riscaldamento o raffreddamento intermittente.

Il calcolo del fattore adimensionale di riduzione per riscaldamento intermittente  $a_{H,red}$ , è dato dalla formula:

$$a_{H,red} = 1 - b_{H,red} \cdot \left( \frac{\tau_{H,0}}{\tau} \right) \cdot \gamma_H \cdot (1 - f_{H,hr})$$

Il calcolo del fattore adimensionale di riduzione per raffreddamento intermittente  $a_{C,red}$ , è dato dalla formula:

$$a_{C,red} = 1 - b_{C,red} \cdot \left( \frac{\tau_{C,0}}{\tau} \right) \cdot \gamma_C \cdot (1 - f_{C,hr})$$

Come output il modello fornisce, per ogni giorno medio rappresentativo del mese, un profilo orario di:

- carico latente;
- carico totale di riscaldamento;
- carico totale di raffreddamento;
- temperatura dell'aria dell'ambiente interno (nel caso in cui gli impianti siano considerati spenti);

- temperatura media delle superfici disperdenti;
- umidità specifica dell'ambiente interno.

In Figura 26 e in Figura 27 sono presentati, rispettivamente, il foglio di output dei profili orari dei carichi totali di riscaldamento e di raffrescamento per i giorni medi rappresentativi di ciascun mese, ed il grafico di output con il profilo orario delle temperature interne calcolate dal modello R5C1.

|    | A   | B        | C        | D                                                            | E      | F       | G       | H       | I       | J         | K        | L             | M        | N          | O         | P         |
|----|-----|----------|----------|--------------------------------------------------------------|--------|---------|---------|---------|---------|-----------|----------|---------------|----------|------------|-----------|-----------|
| 1  |     |          |          | BILANCI ENERGETICI ANNUALI TOTALI E CALCOLO DI EP,CI e EP,CE |        |         |         |         |         | PALERMO   | B        |               |          |            |           |           |
| 2  |     |          |          |                                                              |        |         |         |         |         |           |          |               |          |            |           |           |
| 3  |     | Gennaio  | Febbraio | Marzo                                                        | Aprile | Maggio  | Giugno  | Luglio  | Agosto  | Settembre | Ottobre  | Novembre      | Dicembre |            | Imp. Acce | Imp. Acce |
| 4  | Ora | kWh      | kWh      | kWh                                                          | kWh    | kWh     | kWh     | kWh     | kWh     | kWh       | kWh      | kWh           | kWh      |            | Inverno   | Estate    |
| 5  | 1   | 4.29     | 3.31     | 3.80                                                         | 2.53   | 0.54    | -0.58   | -0.72   | -0.78   | -0.66     | 0.59     | 1.59          | 3.46     |            | 1         | 0         |
| 6  | 2   | 3.86     | 2.96     | 3.42                                                         | 2.26   | 0.43    | -0.56   | -0.70   | -0.76   | -0.65     | 0.47     | 1.38          | 3.09     |            | 1         | 0         |
| 7  | 3   | 3.49     | 2.66     | 3.09                                                         | 2.02   | 0.34    | -0.55   | -0.68   | -0.74   | -0.64     | 0.37     | 1.20          | 2.78     |            | 1         | 0         |
| 8  | 4   | 3.17     | 2.40     | 2.82                                                         | 1.82   | 0.28    | -0.53   | -0.66   | -0.72   | -0.63     | 0.28     | 1.04          | 2.51     |            | 1         | 0         |
| 9  | 5   | 2.89     | 2.18     | 2.58                                                         | 1.64   | 0.20    | -0.54   | -0.67   | -0.72   | -0.62     | 0.21     | 0.91          | 2.28     |            | 1         | 0         |
| 10 | 6   | 2.65     | 1.99     | 2.36                                                         | 1.48   | 0.13    | -0.56   | -0.69   | -0.72   | -0.62     | 0.15     | 0.79          | 2.08     |            | 1         | 0         |
| 11 | 7   | 2.44     | 1.83     | 2.18                                                         | 1.34   | 0.02    | -0.59   | -0.73   | -0.73   | -0.62     | 0.09     | 0.69          | 1.91     |            | 1         | 0         |
| 12 | 8   | 2.24     | 1.65     | 1.98                                                         | 1.15   | -0.17   | -0.63   | -0.79   | -0.79   | -0.67     | -0.02    | 0.58          | 1.75     |            | 1         | 0         |
| 13 | 9   | 2.04     | 1.47     | 1.72                                                         | 0.89   | -0.45   | -0.69   | -0.87   | -0.87   | -0.73     | -0.21    | 0.44          | 1.59     |            | 1         | 1         |
| 14 | 10  | 1.82     | 1.23     | 1.38                                                         | 0.55   | -0.65   | -0.76   | -0.97   | -1.00   | -0.83     | -0.51    | 0.23          | 1.41     |            | 1         | 1         |
| 15 | 11  | 1.59     | 0.99     | 1.06                                                         | 0.21   | -0.68   | -0.79   | -1.01   | -1.05   | -0.87     | -0.64    | 0.02          | 1.22     |            | 1         | 1         |
| 16 | 12  | 1.34     | 0.73     | 0.74                                                         | -0.16  | -0.69   | -0.80   | -1.04   | -1.08   | -0.90     | -0.66    | -0.20         | 1.02     |            | 1         | 1         |
| 17 | 13  | 1.10     | 0.49     | 0.47                                                         | -0.47  | -0.67   | -0.79   | -1.04   | -1.07   | -0.91     | -0.66    | -0.40         | 0.83     |            | 1         | 1         |
| 18 | 14  | 0.91     | 0.28     | 0.22                                                         | -0.47  | -0.67   | -0.79   | -1.04   | -1.07   | -0.91     | -0.65    | -0.51         | 0.68     |            | 1         | 1         |
| 19 | 15  | 0.77     | 0.13     | 0.03                                                         | -0.46  | -0.67   | -0.78   | -1.02   | -1.06   | -0.89     | -0.62    | -0.49         | 0.56     |            | 1         | 1         |
| 20 | 16  | 0.70     | 0.07     | -0.07                                                        | -0.43  | -0.66   | -0.76   | -1.00   | -1.04   | -0.85     | -0.59    | -0.47         | 0.51     |            | 1         | 1         |
| 21 | 17  | 0.68     | 0.06     | -0.09                                                        | -0.41  | -0.63   | -0.74   | -0.97   | -1.00   | -0.82     | -0.57    | -0.45         | 0.49     |            | 1         | 1         |
| 22 | 18  | 0.70     | 0.10     | -0.04                                                        | -0.39  | -0.60   | -0.72   | -0.93   | -0.96   | -0.77     | -0.54    | -0.43         | 0.52     |            | 1         | 1         |
| 23 | 19  | 0.76     | 0.19     | 0.07                                                         | -0.36  | -0.55   | -0.69   | -0.88   | -0.91   | -0.72     | -0.51    | -0.40         | 0.55     |            | 1         | 1         |
| 24 | 20  | 0.81     | 0.26     | 0.17                                                         | -0.35  | -0.53   | -0.67   | -0.85   | -0.87   | -0.70     | -0.49    | -0.39         | 0.58     |            | 1         | 1         |
| 25 | 21  | 0.84     | 0.31     | 0.25                                                         | -0.34  | -0.52   | -0.65   | -0.82   | -0.85   | -0.69     | -0.49    | -0.36         | 0.60     |            | 1         | 0         |
| 26 | 22  | 0.85     | 0.34     | 0.31                                                         | -0.34  | -0.51   | -0.63   | -0.80   | -0.84   | -0.69     | -0.49    | -0.34         | 0.60     |            | 1         | 0         |
| 27 | 23  | 0.87     | 0.39     | 0.38                                                         | -0.31  | -0.50   | -0.61   | -0.77   | -0.82   | -0.68     | -0.48    | -0.30         | 0.62     |            | 1         | 0         |
| 28 | 24  | 0.90     | 0.42     | 0.44                                                         | -0.22  | -0.48   | -0.59   | -0.75   | -0.80   | -0.67     | -0.47    | -0.27         | 0.63     |            | 1         | 0         |
| 29 |     | 41.71    | 26.45    | 29.48                                                        | 15.89  | -7.69   | -15.99  | -20.38  | -21.24  | -17.77    | 2.15     | 8.87          | 32.25    |            |           |           |
| 30 |     |          |          |                                                              |        |         |         |         |         |           |          |               |          |            |           |           |
| 31 |     | 41.71    | 26.45    | 29.28                                                        | 11.17  | -7.46   | -8.97   | -11.60  | -11.99  | -9.92     | -6.46    | 3.87          | 32.25    | kWh/giorno |           |           |
| 32 |     | 1292.87  | 740.59   | 907.66                                                       | 0.00   | -231.19 | -269.01 | -359.73 | -371.71 | -297.64   | 0.00     | 0.00          | 999.79   | kWh/mese   |           |           |
| 33 |     |          |          |                                                              |        |         |         |         |         |           |          |               |          |            |           |           |
| 34 |     | QH       | 3940.91  | kWh/anno                                                     |        |         |         |         |         | QC        | -1529.27 | kWh/anno      |          |            |           |           |
| 35 |     | EPci.inv | 40.09    | kWh/(m².anno)                                                |        |         |         |         |         | EPce.inv  | -15.56   | kWh/(m².anno) |          |            |           |           |
| 36 |     | Eta      | 0.74     |                                                              |        |         |         |         |         |           |          |               |          |            |           |           |
| 37 |     | EPci     | 54.18    | kWh/(m².anno)                                                |        |         |         |         |         |           |          |               |          |            |           |           |

Figura 26. Foglio di output dei profili orari dei carichi totali di riscaldamento e raffrescamento

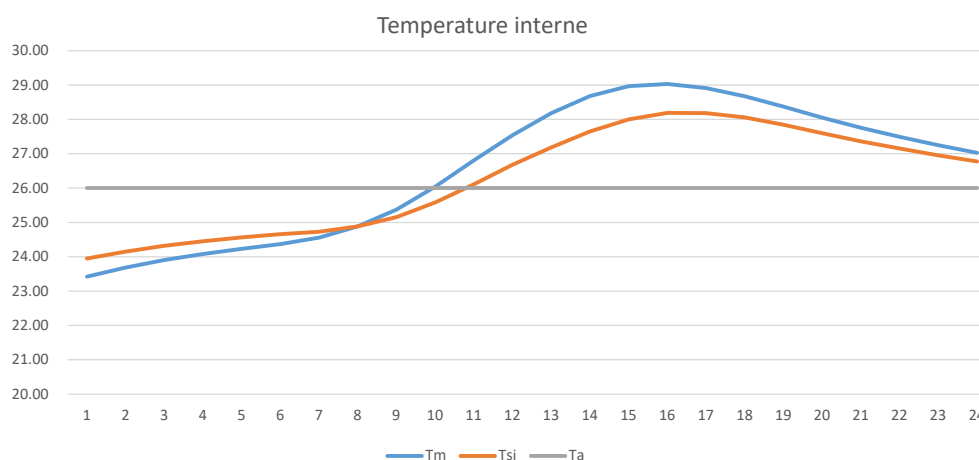


Figura 27. Output: profilo orario delle temperature del modello R5C1

Infine, il modello fornisce anche i fattori adimensionali di riduzione per riscaldamento intermittente e per raffrescamento intermittente. In Figura 28 è riportato un estratto del foglio in cui è calcolato e restituito il fattore di riduzione per riscaldamento intermittente  $a_{H,red}$ .



| D42 |     |          |          |          |          |         |         |         |         |         |          |          |          |           |         |        |
|-----|-----|----------|----------|----------|----------|---------|---------|---------|---------|---------|----------|----------|----------|-----------|---------|--------|
|     | A   | B        | C        | D        | E        | F       | G       | H       | I       | J       | K        | L        | M        | N         | O       | P      |
|     | Ora | Wh       | Wh       | Wh       | Wh       | Wh      | Wh      | Wh      | Wh      | Wh      | Wh       | Wh       | Wh       |           | Inverno | Estate |
| 4   | 1   | 488.15   | 492.60   | 508.39   | 526.16   | 531.92  | 520.87  | 497.64  | 505.86  | 526.30  | 530.80   | 514.33   | 494.50   |           | 1       | 0      |
| 5   | 2   | 487.54   | 491.50   | 506.56   | 524.37   | 532.47  | 523.24  | 503.91  | 510.42  | 528.41  | 529.82   | 513.42   | 493.73   |           | 1       | 0      |
| 6   | 3   | 486.95   | 490.79   | 505.20   | 522.05   | 532.90  | 525.83  | 508.65  | 513.76  | 529.49  | 529.00   | 512.51   | 492.97   |           | 1       | 0      |
| 7   | 4   | 486.67   | 490.11   | 503.84   | 520.00   | 533.21  | 527.61  | 511.28  | 516.07  | 530.13  | 528.11   | 512.06   | 492.23   |           | 1       | 0      |
| 8   | 5   | 486.39   | 489.77   | 502.50   | 519.16   | 539.85  | 530.58  | 518.69  | 516.81  | 530.72  | 527.49   | 511.60   | 491.50   |           | 1       | 0      |
| 9   | 6   | 486.11   | 489.11   | 501.61   | 670.64   | 1368.67 | 1646.58 | 1383.86 | 801.62  | 549.70  | 527.17   | 511.14   | 491.50   |           | 1       | 0      |
| 10  | 7   | 485.84   | 488.78   | 630.80   | 1264.07  | 2011.11 | 2215.14 | 2055.74 | 1509.28 | 980.02  | 585.96   | 510.68   | 491.15   |           | 1       | 0      |
| 11  | 8   | 494.86   | 557.85   | 1104.66  | 1775.81  | 2496.84 | 2669.26 | 2577.54 | 2082.91 | 1569.66 | 1002.95  | 605.21   | 500.70   |           | 1       | 0      |
| 12  | 9   | 708.69   | 834.65   | 1599.41  | 2339.16  | 3097.33 | 3261.41 | 3234.28 | 2723.61 | 2155.14 | 1480.25  | 900.00   | 707.36   |           | 1       | 1      |
| 13  | 10  | 973.33   | 1111.02  | 1977.51  | 2718.33  | 3456.49 | 3597.21 | 3621.69 | 3143.72 | 2563.72 | 1835.72  | 1133.63  | 943.74   |           | 1       | 1      |
| 14  | 11  | 1104.76  | 1267.07  | 2107.02  | 2772.93  | 3430.45 | 3549.65 | 3617.34 | 3199.43 | 2646.16 | 1937.21  | 1221.27  | 1052.45  |           | 1       | 1      |
| 15  | 12  | 1073.75  | 1228.58  | 1930.86  | 2448.88  | 2954.99 | 3044.14 | 3124.53 | 2792.93 | 2329.70 | 1736.16  | 1135.22  | 1009.52  |           | 1       | 1      |
| 16  | 13  | 1091.47  | 1249.85  | 1941.55  | 2420.78  | 2903.21 | 2996.77 | 3099.85 | 2763.85 | 2276.01 | 1676.57  | 1109.23  | 1005.26  |           | 1       | 1      |
| 17  | 14  | 993.84   | 1128.94  | 1731.47  | 2128.99  | 2540.08 | 2632.41 | 2721.42 | 2415.19 | 1960.55 | 1429.92  | 982.90   | 905.87   |           | 1       | 1      |
| 18  | 15  | 823.66   | 915.08   | 1368.37  | 1649.44  | 1957.70 | 2032.48 | 2082.92 | 1834.31 | 1477.32 | 1088.02  | 800.60   | 746.45   |           | 1       | 1      |
| 19  | 16  | 639.25   | 687.45   | 954.01   | 1114.96  | 1292.52 | 1328.82 | 1322.53 | 1170.75 | 969.31  | 763.70   | 624.96   | 589.66   |           | 1       | 1      |
| 20  | 17  | 538.98   | 582.46   | 767.69   | 887.45   | 1018.19 | 1044.60 | 1013.68 | 897.44  | 752.19  | 617.52   | 540.77   | 515.79   |           | 1       | 1      |
| 21  | 18  | 502.94   | 516.12   | 614.42   | 706.33   | 797.02  | 814.21  | 764.75  | 682.08  | 587.31  | 539.08   | 525.46   | 506.11   |           | 1       | 1      |
| 22  | 19  | 498.16   | 502.05   | 527.17   | 574.32   | 632.61  | 645.22  | 582.56  | 534.16  | 505.17  | 533.02   | 522.05   | 501.61   |           | 1       | 1      |
| 23  | 20  | 495.29   | 499.87   | 520.42   | 532.63   | 1018.74 | 1980.67 | 1756.41 | 626.93  | 502.91  | 533.48   | 520.00   | 499.87   |           | 1       | 1      |
| 24  | 21  | 493.35   | 498.16   | 517.87   | 531.83   | 524.84  | 497.64  | 446.43  | 472.03  | 509.55  | 533.32   | 518.73   | 498.16   |           | 1       | 0      |
| 25  | 22  | 491.15   | 496.91   | 515.22   | 530.56   | 527.61  | 504.90  | 461.38  | 483.13  | 515.32  | 532.99   | 517.44   | 496.91   |           | 1       | 0      |
| 26  | 23  | 489.77   | 495.29   | 512.97   | 529.55   | 529.14  | 510.42  | 474.91  | 493.09  | 519.58  | 532.34   | 516.12   | 495.69   |           | 1       | 0      |
| 27  | 24  | 488.47   | 494.11   | 510.68   | 528.11   | 530.13  | 515.32  | 485.73  | 500.86  | 523.24  | 531.64   | 514.78   | 494.50   |           | 1       | 0      |
| 28  |     | 15309.37 | 16498.13 | 22860.22 | 28736.50 | 0.00    | 0.00    | 0.00    | 0.00    | 0.00    | 21062.23 | 16274.12 | 14917.23 | Wh/giorno |         |        |
| 29  |     |          |          |          |          |         |         |         |         |         |          |          |          |           |         |        |
| 30  |     |          |          |          |          |         |         |         |         |         |          |          |          |           |         |        |
| 31  |     |          |          |          |          |         |         |         |         |         |          |          |          |           |         |        |
| 32  |     | 474.59   | 461.95   | 708.67   | 431.05   | 0.00    | 0.00    | 0.00    | 0.00    | 0.00    | 315.93   | 488.22   | 462.43   | kWh/mese  |         |        |
| 33  |     |          |          |          |          |         |         |         |         |         |          |          |          |           |         |        |
| 34  |     |          |          |          |          |         |         |         |         |         |          |          |          |           |         |        |
| 35  |     |          |          |          |          |         |         |         |         |         |          |          |          |           |         |        |
| 36  |     |          |          |          |          |         |         |         |         |         |          |          |          |           |         |        |
| 37  |     |          |          |          |          |         |         |         |         |         |          |          |          |           |         |        |
| 38  |     |          |          |          |          |         |         |         |         |         |          |          |          |           |         |        |
| 39  |     |          |          |          |          |         |         |         |         |         |          |          |          |           |         |        |
| 40  |     |          |          |          |          |         |         |         |         |         |          |          |          |           |         |        |
| 41  |     |          |          |          |          |         |         |         |         |         |          |          |          |           |         |        |
| 42  |     |          |          |          |          |         |         |         |         |         |          |          |          |           |         |        |

Figura 28. Foglio per il calcolo del fattore di riduzione in caso di funzionamento intermittente dell'impianto di riscaldamento

## 2.5. LCA urbano

La letteratura scientifica internazionale circa l'applicazione della metodologia LCA all'ambiente costruito e, in particolare, alla scala dell'isolato, del quartiere e della città (LCA urbana) è stata revisionata al fine di individuare le carenze applicative della metodologia LCA alle succitate scale.

Tra le metodologie quantitative in grado di valutare la sostenibilità di un prodotto, la LCA è stata riconosciuta come la metodologia migliore per l'applicazione alla scala dell'isolato o alla scala urbana, in quanto consente di non spostare gli impatti da una scala temporale ad un'altra (es. dalla fase di costruzione alla fase d'uso) o da una scala spaziale ad un'altra (es. dalla meso-scala alla scala globale).

Tradizionalmente la LCA applicata all'ambiente urbano si limita all'applicazione della metodologia comparativa agli edifici. Tuttavia, negli ultimi anni l'applicazione della LCA alla scala di quartiere e urbana sta acquistando slancio. In letteratura si possono trovare studi in cui la LCA è applicata alla scala urbana, ma, come sottolineato in alcuni articoli scientifici, molto spesso tali studi si focalizzano solo su di un aspetto peculiare (es. gli edifici) omettendo di valutare le interazioni tra ambiente costruito e clima locale. Pertanto, tali studi forniscono risultati parziali e alcune volte fuorvianti circa gli impatti che l'ambiente costruito può avere. È pertanto prioritario implementare la metodologia LCA al fine di rendere attendibili le valutazioni ambientali che ne scaturiscono. Infatti, le interazioni tra ambiente costruito e clima urbano possono essere anche importanti, dato che si originano con la costruzione di edifici e infrastrutture ed esercitano i loro impatti durante tutta la vita utile dell'ambiente costruito.

Allo stato attuale, la metodologia LCA applicata alla meso-scala (cioè alla scala che va dall'isolato al quartiere) non distingue, in termini di impatti, due agglomerati urbani che possono contribuire in misura diversa alla formazione dell'isola di calore urbana. Ad esempio, lo stesso agglomerato urbano caratterizzato da due diversi albedo viene valutato esattamente nello stesso modo—a meno degli impatti relativi alla domanda energetica degli edifici—nonostante contribuisca diversamente alla formazione dell'isola di calore urbana. Di conseguenza, ogni qualvolta i decisori urbani fanno affidamento a studi di LCA urbana per prendere decisioni ambientali da applicare alla scala urbana, falliscono nello sviluppare, implementare e applicare misure di



adattamento ai cambiamenti climatici. Ancora più importante è che l'applicazione stessa di strategie di mitigazione dell'isola di calore urbana non vengano valutate nell'ottica dell'interazione tra ambiente costruito e clima locale. Di conseguenza, nelle valutazioni LCA di questo tipo viene omessa la valutazione ambientale per cui le stesse strategie di mitigazione sono poste in essere. Quest'ultimo aspetto rappresenta una contraddizione.

Al fine di dimostrare che la letteratura pubblicata relativa alle strategie di mitigazione del clima urbano ometta questa fondamentale interazione, è stata revisionata la letteratura internazionale rispondente alle parole chiave: "life cycle assessment" e "urban heat island mitigation". Della letteratura rispondente simultaneamente a queste due parole chiave in Web of Knowledge, sono stati selezionati gli articoli scientifici che riportassero casi di studio attinenti al tema; ovvero 18 articoli scientifici pubblicati su riviste internazionali.

In Tabella 9 sono stati riportati gli articoli selezionati e degli stessi sono stati indicati: l'unità funzionale; se la fase d'uso è stata inclusa nello studio; la scala di applicazione dello studio; se l'effetto dell'applicazione della strategia di mitigazione è stato incluso nello studio LCA.

Tabella 9 mostra come circa il 30% degli studi revisionati facciano riferimento ad una unità funzionale di  $1\text{m}^2$ . In questi casi l'omissione della valutazione dei potenziali effetti di mitigazione sul clima urbano può essere giustificata dal fatto che molto difficilmente tale unità funzionale possa sortire effetti sull'isola di calore urbana. Tuttavia, la potenziale applicazione dei risultati di questi studi applicati ad una scala maggiore potrebbero implicare l'esclusione della valutazione di impatti che potrebbero risultare importanti. Circa il 60% degli studi revisionati utilizza una unità funzionale che varia dalla superficie di un solaio di copertura ad un paio di ettari. Tra questi articoli solo due si interrogano sull'effetto dell'applicazione della strategia di mitigazione dell'isola di calore urbana sulla domanda energetica degli edifici. Tuttavia, nessuno degli studi include l'effetto sulla temperatura urbana e gli effetti conseguenti sulla qualità dell'aria e sulla salute umana. È stata selezionata anche letteratura scientifica non rispondente ai criteri di selezione che, tuttavia, risultava interessante ai fini del tema di ricerca. Alcuni studi (i.e., (57–59)) hanno tradotto l'effetto della pavimentazione stradale sull'isola di calore urbana in termini di Global Warming Potential (GWP), omettendo, però, la quantificazione degli impatti sugli ecosistemi e sulla salute umana. Susca (2012) (60) ha valutato gli effetti della mitigazione dell'isola di calore urbana per mezzo dell'aumento dell'albedo urbana sulla salute umana, omettendo, però, quelli sugli ecosistemi.

**Tabella 9. Revisione della letteratura circa gli studi LCA focalizzati sulle strategie di mitigazione dell'isola di calore urbana. Fonte: (2)**

| Reference | Mitigation strategy(ies)                                           | Functional unit                                                                                                                                | Use phase | Scale of application | Inclusion of the effect on UHI in the LCA results | Notes                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
|-----------|--------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|----------------------|---------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| (61)      | Cool and green roof                                                | 1 m <sup>2</sup>                                                                                                                               | Yes       | Building             | No                                                | Comparative LCA                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| (62)      | Permeable pavement and street trees                                | 2.66 hectares comprising one block of Stratford Avenue in New York City                                                                        | Yes       | Functional unit      | No                                                | The study explores the stormwater runoff reduction related to the substitution of impervious pavements with permeable ones and tree planting                                                                                                                                              |
| (63)      | Green roofs                                                        | 1 kg of each material composing the green roof                                                                                                 | Yes       | Urban                | No                                                |                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| (64)      | Green façades and living walls                                     | 1 m <sup>2</sup>                                                                                                                               | Yes       | Functional unit      | No                                                |                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| (65)      | Green roof                                                         | Replacing about 6.5 million sq ft of traditional roofing with a green roof in an urban neighborhood                                            | Yes       | Functional unit      | Yes                                               | The impact of the green roof on the UHI has been evaluated just in terms of GHG reduction due to the decrease in energy use entailed by the UHI mitigation                                                                                                                                |
| (66)      | Green roofs                                                        | 1115 m <sup>2</sup>                                                                                                                            | Yes       | Functional unit      | No                                                |                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| (67)      | Cool roof                                                          | 1 m <sup>2</sup>                                                                                                                               | Yes       | Functional unit      | No                                                |                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| (68)*     | Pavements                                                          | 1 km lane (equal to 3600 m <sup>2</sup> )                                                                                                      | Yes       | Functional unit      | Yes                                               | The impact from the variation in surface albedo on urban heat island has been calculated through a relationship between albedo and electricity consumption. Then the effect of variation in albedo on energy consumption has been translated into kilograms of carbon dioxide equivalents |
| (69)      | Green façade (direct and indirect greening system) and living wall | Not specified in the article                                                                                                                   | Yes       |                      | No                                                |                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| (70)      | Bioretention basin, green roof and permeable pavement              | Each green infrastructure has the capacity to store the runoff associated with 2.5 cm of rainfall generated over 79 m <sup>3</sup> watershed** | Yes       | Functional unit      | No                                                | A consequential LCA has been performed in the study                                                                                                                                                                                                                                       |
| (71)      | Living walls                                                       | 1 m <sup>2</sup>                                                                                                                               | Yes       | Functional unit      | No                                                |                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| (72)      | Green roofs                                                        | 1 m <sup>2</sup>                                                                                                                               | No        | Functional unit      | No                                                |                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| (73)      | Green roofs                                                        | An educational building                                                                                                                        | Yes       | Functional unit      | No                                                | The study focuses on carbon dioxide life cycle assessment of green roofs                                                                                                                                                                                                                  |
| (74)      | Urban vegetation (6 lawns)                                         | 1 ha lawn in a redevelopment area/urban park                                                                                                   | No        | Functional unit      | No                                                |                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| (75)      | Green and cool roof                                                | 1340 m <sup>2</sup> roof of an office building                                                                                                 | Yes       | Functional unit      | No                                                |                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| (76)      | White and green roofs                                              | "The construction and installation of a roofing system to cover a surface of 834 m <sup>2</sup> for 45 years"                                  | No        | Functional unit      | No                                                |                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| (77)      | Urban parks                                                        | "Mass of CO <sub>2</sub> "                                                                                                                     | Yes       | Functional unit      | No                                                | The Life Cycle Impact Assessment (LCIA) is focused on carbon dioxide                                                                                                                                                                                                                      |
| (78)      | Green and white roof                                               | A whole building                                                                                                                               | Yes       | Functional unit      | No                                                |                                                                                                                                                                                                                                                                                           |

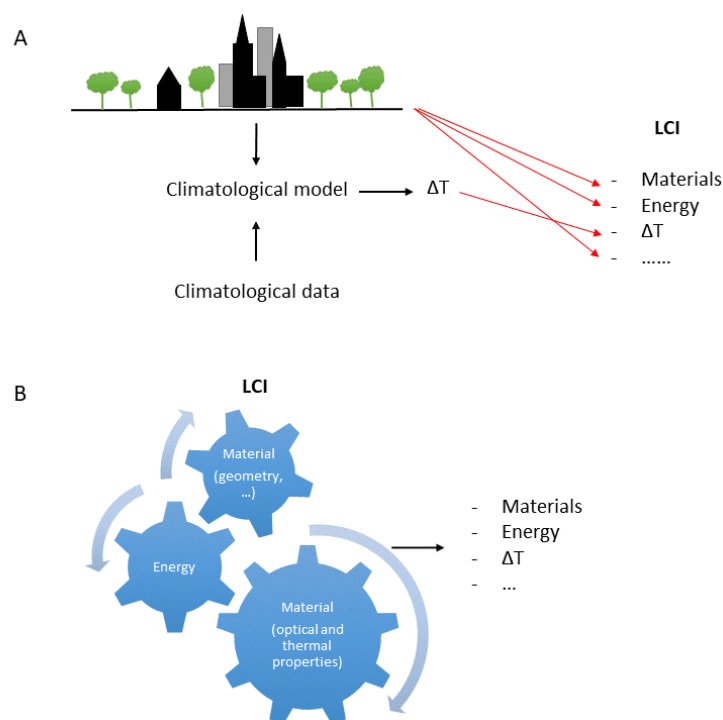
\* The article is not specifically focused on pavements as UHI-mitigation measures. However, in the calculation of the impacts related to pavements, the authors include the effect of albedo on UHI

\*\* The functional unit for the bio-retention basin, the green roof, and the permeable pavement correspond to 137 m<sup>2</sup>, 1298 m<sup>2</sup>, and 4047 m<sup>2</sup>, respectively

In sintesi, non sono stati trovati, tra la letteratura scientifica internazionale pubblicata, studi che includano in modo olistico l'effetto dell'interazione tra ambiente costruito e isola di calore urbana. L'analisi della letteratura ha anche mostrato che i risultati delle valutazioni LCA applicati ad agglomerati urbani o misure di mitigazione dell'isola di calore urbana risultano inaccurati e incompleti stante la corrente applicazione della metodologia LCA. A completamento di questa attività di revisione della letteratura scientifica si è sviluppata una concettualizzazione dell'LCA che possa superare i limiti attuali: identificando i potenziali miglioramenti al fine di includere l'interazione tra l'ambiente costruito e il clima urbano; offrendo percorsi potenziali al fine di integrare l'isola di calore urbana e i suoi effetti nella metodologia LCA; suggerendo potenziali indicatori e modelli di caratterizzazione che possano essere integrati nella metodologia LCA. In particolare, sono stati sviluppati e consigliati due approcci schematizzati in Figura 29.

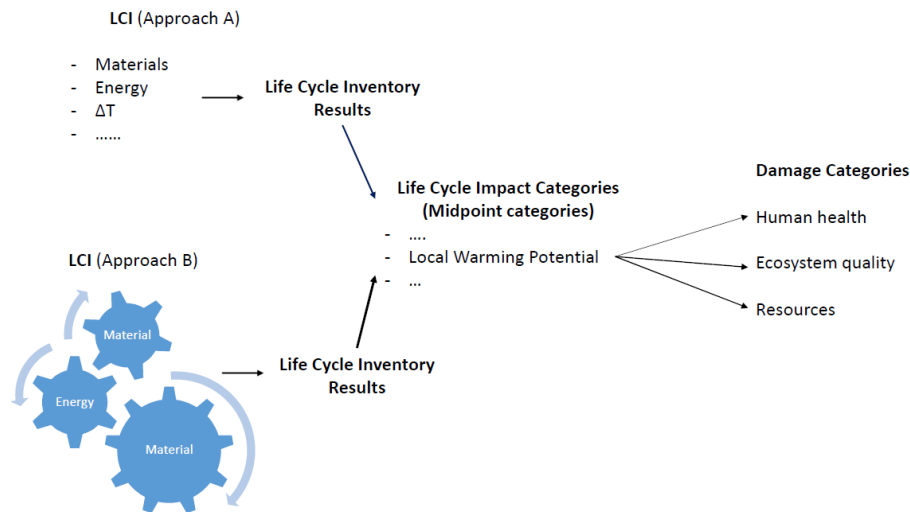
L'Approccio A si basa su di un modello fisico con una risoluzione spaziale che simula le interazioni tra l'ambiente costruito e clima locale e che fornisce le conseguenti variazioni di temperatura che poi possono essere inserite nel Life Cycle Inventory (LCI) dello studio LCA dell'ambiente costruito.

L'approccio B è un approccio statistico e aggregato spazialmente che utilizza modellazioni matematiche relative alle relazioni fisiche predominanti tra la variazione nei parametri urbani e l'isola di calore urbana.



**Figura 29. Visualizzazione degli approcci sviluppati (Approccio A e Approccio B) per implementare la valutazione delle strategie di mitigazione dell'isola di calore urbana nella metodologia LCA. Fonte: (2)**

A prescindere dall'approccio utilizzato, lo schema di LCA urbana sviluppato prevede che i risultati del LCI convergano in una categoria di impatto (fase di classificazione). Tuttavia, la struttura classica della LCA non prevede una categoria di impatto intermedia che includa le variazioni di temperature urbane. Pertanto si propone di utilizzare una categoria di impatto intermedia che è stata chiamata Local Warming Potential (LWP) (Figura 30).



**Figura 30. Struttura generale della LCA urbana con gli approcci proposti al fine di includere la valutazione degli impatti dell'isola di calore urbana. Fonte: (2)**

La metrica suggerita per questa innovativa categoria intermedia di impatto è “°C al di sopra di una soglia”. Le soglie possono cambiare al variare della città o dell'area climatica in cui si applica lo studio. Per sostenere la LCA urbana dovrebbero essere sviluppati una serie di fattori di caratterizzazione *ad-hoc*; in alternativa, i fattori di caratterizzazione dovrebbero essere recuperati dalla letteratura pubblicata al fine di includere gli effetti sulla salute umana e sulla qualità degli ecosistemi, in modo che gli impatti vengano poi raggruppati nelle categorie di danno: *uso delle risorse; salute umana; qualità degli ecosistemi*.

Nel complesso, lo studio condotto propone un rilevante avanzamento metodologico nella LCA al fine di scalare l'applicazione della metodologia LCA dall'edificio al contesto urbano.

### 3 Conclusioni

Il lavoro di ricerca svolto durante la prima annualità di ricerca di sistema, ha evidenziato le potenzialità che i tetti e le pareti verdi hanno sulla micro-scala, ovvero la scala dell'edificio, e sulla meso-scala, ovvero la scala urbana.

L'installazione di tetti verdi, a seconda dell'area climatica e delle caratteristiche del solaio di copertura può determinare un minore consumo di energia per il raffrescamento e il riscaldamento degli edifici. Tuttavia, l'installazione di tetti verdi non ha effetti significativi sulla mitigazione dell'isola di calore urbana. Questo ultimo risultato dovrà, tuttavia, essere confrontato durante la prossima annualità con altri dati di letteratura relativi all'installazione sistemica dei tetti verdi.

L'installazione di pareti verdi può determinare una riduzione dell'energia per il raffrescamento. È stato possibile notare che, con l'esclusione dell'area climatica calda temperata con estati molto calde e secche (Csa), la variazione percentuale dell'energia per raffrescamento per l'intera stagione calda è compresa tra 0 e -18% circa, con valori che sono influenzati principalmente dal numero e dall'orientamento delle facciate su cui le pareti verdi sono applicate, e con i living wall che in genere forniscono riduzioni di energia maggiori rispetto alle facciate verdi.

Sono stati confrontati i dati circa l'effetto dell'installazione delle pareti verdi sulle temperature superficiali. Queste ultime sono state confrontate con le temperature superficiali, sia diurne che notturne, di pareti spoglie. Dall'analisi dei dati è risultato che non vi è una uniforme distribuzione di studi per ciascuna delle aree climatiche. Quindi, se per alcune aree climatiche si è estratto un numero significativo di dati, in grado di delineare un comportamento generalizzabile derivante dall'installazione di pareti verdi, per altre lo studio della letteratura scientifica verrà ulteriormente espanso nella prossima annualità. In generale, si è osservato che l'installazione di pareti verdi determina una diminuzione della temperatura superficiale durante le ore diurne, mentre, durante le ore notturne tale differenza si annulla in corrispondenza di facciate verdi e si attesta intorno ai 2 °C nel caso di living wall. Durante, le ore diurne, inoltre, si rileva che le temperature superficiali sulle pareti verdi possono essere inferiori rispetto alle pareti nude di circa 1 – 5 °C nelle stagioni di minore attività biologica delle piante (i.e., autunno e inverno) e attestarsi su valori molto maggiori in estate nel caso di pareti verdi esposte a sud.

Similmente, si è evidenziato che se l'installazione di pareti verdi su di un singolo edificio non ha nessun effetto significativo sulla mitigazione dell'isola di calore urbana. Tuttavia, gli studi revisionati hanno anche mostrato che una installazione sistemica di pareti verdi, può mitigare sensibilmente la temperatura dell'aria, a seconda dell'area climatica. Dalla revisione della letteratura pubblicata negli scorsi cinque anni, si è anche visto che solo per poche aree climatiche il numero di dati di letteratura è statisticamente rappresentativo per poter essere usato per descrivere un comportamento generalizzabile delle pareti verdi. Pertanto, nella prossima annualità la revisione della letteratura verrà espansa.

Inoltre, il lavoro condotto nella prima annualità del progetto ha portato a determinare sia le tipologie edilizie più frequenti sul territorio nazionale nelle diverse aree geografiche, sia uno strumento di calcolo, che verrà utilizzato nel prosieguo del progetto, per il calcolo degli effetti della mitigazione dell'isola di calore, in diverse aree climatiche in Italia, sul consumo energetico degli edifici.

Infine, la revisione della letteratura circa l'applicazione della metodologia LCA alla scala urbana, ha mostrato che non solo non esistono studi in cui vengano computati gli effetti dell'interazione tra ambiente costruito e clima locale, ma che questa valutazione è essenziale affinché non vengano poste in essere politiche urbane che, basandosi su studi LCA, risultino inefficaci se non dannose. Pertanto, sono stati proposti due approcci LCA che potrebbero consentire di superare il problema. Nel corso della terza annualità di questa ricerca, l'uno o l'altro di questi approcci verrà sviluppato in modo da colmare le lacune ad oggi riscontrabili nell'applicazione della LCA alle città.

Il lavoro condotto in questa prima annualità è stato sintetizzato in due articoli pubblicati su riviste scientifiche internazionali (i.e., (1,2)). Un altro articolo scientifico è al momento in fieri.

## 4 Riferimenti bibliografici

1. Susca T. Green roofs to reduce building energy use? A review on key structural factors of green roofs and their effects on urban climate. *Building and Environment*. 2019 Sep 1;162:106273.
2. Susca T, Pomponi F. Heat island effects in urban life cycle assessment: Novel insights to include the effects of the urban heat island and UHI-mitigation measures in LCA for effective policy making. *Journal of Industrial Ecology*. 2019;1–14.
3. The World Bank. Urban population [Internet]. The World Bank. 2014 [cited 2018 Jun 14]. Available from: <https://data.worldbank.org/indicator/SP.URB.TOTL.IN.ZS>
4. EUROSTAT. Share of urban and rural populations, 1950–2050 [Internet]. 2016 [cited 2020 Jan 27]. Available from: [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=File:Share\\_of\\_urban\\_and\\_rural\\_populations,\\_1950%E2%80%932050\\_\(%C2%B9\)\\_\(%25\\_of\\_total\\_population\)\\_Cities16.png](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=File:Share_of_urban_and_rural_populations,_1950%E2%80%932050_(%C2%B9)_(%25_of_total_population)_Cities16.png)
5. United Nations. World Urbanization Prospects: The 2005 Revision [Internet]. 2006 [cited 2018 Jun 14]. Available from: <http://www.un.org/esa/population/publications/WUP2005/2005wup.htm>
6. European Commission. Climate Action - European Commission [Internet]. Climate Action - European Commission. 2016 [cited 2020 Jan 27]. Available from: [https://ec.europa.eu/clima/policies/international/paris\\_protocol/cities\\_en](https://ec.europa.eu/clima/policies/international/paris_protocol/cities_en)
7. Gedzelman SD, Austin S, Cermak R, Stefano N, Partridge S, Quesenberry S, et al. Mesoscale aspects of the Urban Heat Island around New York City. *Theor Appl Climatol*. 2003;75(1–2):14.
8. Tran KV, Azhar GS, Nair R, Knowlton K, Jaiswal A, Sheffield P, et al. A Cross-Sectional, Randomized Cluster Sample Survey of Household Vulnerability to Extreme Heat among Slum Dwellers in Ahmedabad, India. *Int J Environ Res Public Health*. 2013 Jun;10(6):2515–43.
9. Mohan M, Kikegawa Y, Gurjar BR, Bhati S, Kandya A, Ogawa K. Assessment of urban heat island intensities over Delhi. 2009;4.
10. Montávez JP, Rodríguez A, Jiménez JI. A study of the Urban Heat Island of Granada. *International Journal of Climatology*. 2000;20(8):899–911.
11. Steeneveld GJ, Koopmans S, Heusinkveld BG, Hove LWA van, Holtslag A a. M. Quantifying urban heat island effects and human comfort for cities of variable size and urban morphology in the Netherlands. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* [Internet]. 2011 Oct 27 [cited 2018 Apr 24];116(D20). Available from: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2011JD015988>
12. UNEP. Impacts o summer 2003 heat wave in Europe [Internet]. 2003. Available from: [https://www.unisdr.org/files/1145\\_ewheatwave.en.pdf](https://www.unisdr.org/files/1145_ewheatwave.en.pdf)
13. Hester ET, Bauman KS. Stream and Retention Pond Thermal Response to Heated Summer Runoff From Urban Impervious Surfaces. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*. 2013;49(2):328–42.
14. Kuttler W. The Urban Climate – Basic and Applied Aspects. In: *Urban ecology* [Internet]. New York: Springer US; 2008 [cited 2018 Jun 15]. p. 233–48. Available from: [http://link.springer.com/10.1007/978-0-387-73412-5\\_13](http://link.springer.com/10.1007/978-0-387-73412-5_13)

15. Santamouris M, Cartalis C, Synnefa A, Kolokotsa D. On the impact of urban heat island and global warming on the power demand and electricity consumption of buildings—A review. *Energy and Buildings*. 2015 Jul 1;98:119–24.
16. Kottek M, Grieser J, Beck C, Rudolf B, Rubel F. World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated. *metz*. 2006 Jul 10;15(3):259–63.
17. Perini K, Bazzocchi F, Croci L, Magliocco A, Cattaneo E. The use of vertical greening systems to reduce the energy demand for air conditioning. Field monitoring in Mediterranean climate. *Energy and Buildings*. 2017 May 15;143:35–42.
18. Yuan S, Rim D. Cooling energy saving associated with exterior greenery systems for three US Department of Energy (DOE) standard reference buildings. *Build Simul*. 2018 Aug 1;11(4):625–31.
19. Wong I, Baldwin AN. Investigating the potential of applying vertical green walls to high-rise residential buildings for energy-saving in sub-tropical region. *Building and Environment*. 2016 Feb 15;97:34–9.
20. Widiastuti R, Caesarendra W, Prianto E, Budi WS. Study on the Leaves Densities as Parameter for Effectiveness of Energy Transfer on the Green Facade. *Buildings*. 2018 Oct;8(10):138.
21. Sudimac B, Andjelkovic A, Dubljevic S. Thermal extras of vegetation walls in Belgrade climatic conditions. *Therm sci*. 2018;22(Suppl. 3):945–55.
22. Poddar S, Park D, Chang S. Energy performance analysis of a dormitory building based on different orientations and seasonal variations of leaf area index | SpringerLink. *Energy and Efficiency*. 10:887–903.
23. Djedjig R, Bozonnet E, Belarbi R. Modeling green wall interactions with street canyons for building energy simulation in urban context. *Urban Climate*. 2016 Jun 1;16:75–85.
24. Djedjig R, Bozonnet E, Belarbi R. Analysis of thermal effects of vegetated envelopes: Integration of a validated model in a building energy simulation program. *Energy and Buildings*. 2015 Jan 1;86:93–103.
25. Dahanayake KWDKC, Chow CL. Studying the potential of energy saving through vertical greenery systems: Using EnergyPlus simulation program. *Energy and Buildings*. 2017 Mar 1;138:47–59.
26. Coma J, Pérez G, de Gracia A, Burés S, Urrestarazu M, Cabeza LF. Vertical greenery systems for energy savings in buildings: A comparative study between green walls and green facades. *Building and Environment*. 2017 Jan 1;111:228–37.
27. de Gracia A, Navarro L, Coma J, Serrano S, Romání J, Pérez G, et al. Experimental set-up for testing active and passive systems for energy savings in buildings – Lessons learnt. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018 Feb 1;82:1014–26.
28. Dahanayake KC, Chow CL. Comparing reduction of building cooling load through green roofs and green walls by EnergyPlus simulations. *Build Simul*. 2018 Jun 1;11(3):421–34.
29. Acero JA, Koh EJY, Li X, Ruefenacht LA, Pignatta G, Norford LK. Thermal impact of the orientation and height of vertical greenery on pedestrians in a tropical area. *Build Simul*. 2019 Dec 1;12(6):973–84.
30. Li J, Zheng B, Shen W, Xiang Y, Chen X, Qi Z. Cooling and Energy-Saving Performance of Different Green Wall Design: A Simulation Study of a Block. *Energies*. 2019 Jan;12(15):2912.

31. Blanco I, Schettini E, Mugnozza GS, Vox G. Thermal behaviour of green façades in summer. *Journal of agricultural engineering* [Internet]. 2018 [cited 2019 Dec 4]; Available from: <http://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=US201900316481>
32. Bianco L, Serra V, Larcher F, Perino M. Thermal behaviour assessment of a novel vertical greenery module system: first results of a long-term monitoring campaign in an outdoor test cell. *Energy Efficiency*. 2017 Jun 1;10(3):625–38.
33. Šuklje T, Medved S, Arkar C. On detailed thermal response modeling of vertical greenery systems as cooling measure for buildings and cities in summer conditions. *Energy*. 2016 Nov 15;115:1055–68.
34. Djedjig R, Belarbi R, Bozonnet E. Experimental study of green walls impacts on buildings in summer and winter under an oceanic climate. *Energy and Buildings*. 2017 Sep 1;150:403–11.
35. Wahba S, Kamil B, Nassar K, Abdelsalam A. Green Envelop Impact on Reducing Air Temperature and Enhancing Outdoor Thermal Comfort in Arid Climates. *Civil Engineering Journal*. 2019 May 21;5(5):1124-1135–1135.
36. Daemei AB, Azmoodeh M, Zamani Z, Khotbehsara EM. Experimental and simulation studies on the thermal behavior of vertical greenery system for temperature mitigation in urban spaces. *Journal of Building Engineering*. 2018 Nov 1;20:277–84.
37. Herath HMPIK, Halwatura RU, Jayasinghe GY. Evaluation of green infrastructure effects on tropical Sri Lankan urban context as an urban heat island adaptation strategy. *Urban Forestry & Urban Greening*. 2018 Jan 1;29:212–22.
38. Jim CY. Thermal performance of climber greenwalls: Effects of solar irradiance and orientation. *Applied Energy*. 2015 Sep 15;154:631–43.
39. Jimenez MS. Green walls: a sustainable approach to climate change, a case study of London. *Architectural Science Review*. 2018 Mar 4;61(1–2):48–57.
40. de Jesus MP, Lourenco RM, Arce RM, Marcias M. Green façades and in situ measurements of outdoor building thermal behaviour - ScienceDirect. *Building and Environment*. 2017;119:11–9.
41. Razzaghmanesh M, Razzaghmanesh M. Thermal performance investigation of a living wall in a dry climate of Australia. *Building and Environment*. 2017 Feb 1;112:45–62.
42. CRESME Ricerche S.p.A. Determinazione dei fabbisogni e dei consumi energetici dei sistemi edificio-impianto. Caratterizzazione del parco immobiliare ad uso residenziale [Internet]. ENEA; [cited 2020 Jan 30]. Available from: [https://www.enea.it/it/Ricerca\\_sviluppo/documenti/ricerca-di-sistema-elettrico/risparmio-energia-settore-civile/2011/109-rds-pdf](https://www.enea.it/it/Ricerca_sviluppo/documenti/ricerca-di-sistema-elettrico/risparmio-energia-settore-civile/2011/109-rds-pdf)
43. Politecnico di Torino. Progetto TABULA [Internet]. [cited 2020 Jan 22]. Available from: <https://areeweb.polito.it/ricerca/episcopo/tabula/>
44. Politecnico di Torino. Progetto EPISCOPE [Internet]. [cited 2020 Jan 22]. Available from: <https://areeweb.polito.it/ricerca/episcopo/>
45. Decreto ministeriale. Legge 30 aprile 1976 n. 373. 373 1976.
46. Decreto ministeriale. Legge 9 gennaio 1991, n. 10 [Internet]. 20 1991. Available from: <https://www.gazzettaufficiale.it/eli/id/1991/01/16/091G0015/sg>



47. Presidenza della Repubblica. Decreto del Presidente della Repubblica 26 agosto 1993, n. 412 - Regolamento recante norme per la progettazione, l'installazione, l'esercizio e la manutenzione degli impianti termici degli edifici ai fini del contenimento dei consumi di energia, in attuazione dell'art. 4, comma 4, della legge 9 gennaio 1991, n. 10. DPR 26 agosto 1993 n. 412 1993.
48. Corrado V, Ballarini I. L'avanzamento della riqualificazione energetica del patrimonio edilizio residenziale regionale [Internet]. 2015. Available from: [https://episcopo.eu/fileadmin/episcopo/public/docs/pilot\\_actions/IT\\_EPISCOPE\\_RegionalCaseStudy\\_POLITO\\_SecEd.pdf](https://episcopo.eu/fileadmin/episcopo/public/docs/pilot_actions/IT_EPISCOPE_RegionalCaseStudy_POLITO_SecEd.pdf)
49. Margiotta F, Puglisi G. Caratterizzazione del parco edilizio nazionale Determinazione dell'edificio tipo per uso ufficio [Internet]. 2009. Available from: [https://www.enea.it/it/Ricerca\\_sviluppo/documenti/ricerca-di-sistema-elettrico/condizionamento/rse164.pdf](https://www.enea.it/it/Ricerca_sviluppo/documenti/ricerca-di-sistema-elettrico/condizionamento/rse164.pdf)
50. EnergyPlus | EnergyPlus [Internet]. [cited 2020 Jan 24]. Available from: <https://energyplus.net/>
51. Odesse [Internet]. [cited 2020 Jan 24]. Available from: [https://www.enea.it/it/Ricerca\\_sviluppo/energia/ricerca-di-sistema-elettrico/accordo-di-programma-mise-enea-2009-2011/razionalizzazione-e-risparmio-nelluso-dellenergia-elettrica/tecnologie-per-lefficienza-energetica-nei-servizi/odesse-1/odesse](https://www.enea.it/it/Ricerca_sviluppo/energia/ricerca-di-sistema-elettrico/accordo-di-programma-mise-enea-2009-2011/razionalizzazione-e-risparmio-nelluso-dellenergia-elettrica/tecnologie-per-lefficienza-energetica-nei-servizi/odesse-1/odesse)
52. Bertini I, Castellazzi L, Di Pietra B, Federici A, Iannucci R, Margiotta F, et al. Integrazione di layout impiantistici nella piattaforma di simulazione ODESSE (Optimal DESignfor Smart Energy) [Internet]. Available from: [https://www.enea.it/it/Ricerca\\_sviluppo/documenti/ricerca-di-sistema-elettrico/efficienza-energetica-servizi/rds-178.pdf](https://www.enea.it/it/Ricerca_sviluppo/documenti/ricerca-di-sistema-elettrico/efficienza-energetica-servizi/rds-178.pdf)
53. Cammarata G, Cammarata M, Capizzi G. Sviluppo di metodologie e strumenti di misura ed analisi dei consumi energetici degli edifici pubblici [Internet]. 2014. Available from: [https://www.enea.it/it/Ricerca\\_sviluppo/documenti/ricerca-di-sistema-elettrico/edifici-pa/2013/rds-par2013-119.pdf](https://www.enea.it/it/Ricerca_sviluppo/documenti/ricerca-di-sistema-elettrico/edifici-pa/2013/rds-par2013-119.pdf)
54. Caldera M, Federici A, Margiotta F, Martelli A, Nocera M, Pannicelli A, et al. Metodologie e strumenti per la raccolta di dati e la definizione di modelli di riferimento dei consumi energetici nel settore residenziale, terziario e pubblico [Internet]. 2016. Available from: [https://www.enea.it/it/Ricerca\\_sviluppo/documenti/ricerca-di-sistema-elettrico/adp-mise-enea-2015-2017/edifici-intelligenti/rds\\_par2015-143.pdf](https://www.enea.it/it/Ricerca_sviluppo/documenti/ricerca-di-sistema-elettrico/adp-mise-enea-2015-2017/edifici-intelligenti/rds_par2015-143.pdf)
55. UNI EN ISO 13790:2008 Prestazione energetica degli edifici. Calcolo del fabbisogno di energia per il riscaldamento e il raffrescamento. 2008.
56. UNI/TS 11300-1:2014 Prestazioni energetiche degli edifici - Parte 1: Determinazione del fabbisogno di energia termica dell'edificio per la climatizzazione estiva ed invernale. 2014.
57. Baral A, Sen S, Roesler JR. Use phase assessment of photocatalytic cool pavements. *Journal of Cleaner Production*. 2018 Jul 20;190:722–8.
58. Sen S, Roesler J. Contextual heat island assessment for pavement preservation. *International Journal of Pavement Engineering*. 2018 Oct 3;19(10):865–73.
59. Sen S, Roesler J. Pavement Geometry in Microscale Urban Heat Islands. In 2017 [cited 2019 Feb 15]. Available from: <https://trid.trb.org/view/1511364>

60. Susca T. Multiscale Approach to Life Cycle Assessment. *Journal of Industrial Ecology*. 2012 Dec 3;16(6):951–62.
61. Susca T, Gaffin SR, Dell’Osso GR. Positive effects of vegetation: Urban heat island and green roofs. *Environmental Pollution*. 2011 Aug 1;159(8):2119–26.
62. Spatari S, Yu Z, Montalto FA. Life cycle implications of urban green infrastructure. *Environmental Pollution*. 2011 Aug 1;159(8):2174–9.
63. Bianchini F, Hewage K. How “green” are the green roofs? Lifecycle analysis of green roof materials. *Building and Environment*. 2012;48:57–65.
64. Ottel  M, Perini K, Fraaij ALA, Haas EM, Raiteri R. Comparative life cycle analysis for green fa ades and living wall systems. *Energy and Buildings*. 2011 Dec 1;43(12):3419–29.
65. Blackhurst M, Hendrickson C, Matthews HS. Cost-Effectiveness of Green Roofs. *Journal of Architectural Engineering*. 2010 Dec;16(4):136–43.
66. Kosareo L, Ries R. Comparative environmental life cycle assessment of green roofs. *Building and Environment*. 2007 Jul 1;42(7):2606–13.
67. Susca T. Enhancement of life cycle assessment (LCA) methodology to include the effect of surface albedo on climate change: Comparing black and white roofs. *Environmental Pollution*. 2012 Apr;163:48–54.
68. Santero NJ, Horvath A. Global warming potential of pavements. *Environmental Research Letters*. 2009 Sep 1;4(3):034011.
69. Perini K, Ottel  M, Haas EM, Raiteri R. Greening the building envelope, facade greening and living wall systems. *Open Journal of Ecology*. 2011;1(1):1–8.
70. Wang R, Eckelman MJ, Zimmerman JB. Consequential Environmental and Economic Life Cycle Assessment of Green and Gray Stormwater Infrastructures for Combined Sewer Systems. *Environmental Science & Technology*. 2013 Oct;47(19):11189–98.
71. Feng H, Hewage K. Lifecycle assessment of living walls: air purification and energy performance. *Journal of Cleaner Production*. 2014 Apr;69:91–9.
72. Gargari C, Bibbiani C, Fantozzi F, Campiotti CA. Environmental Impact of Green Roofing: The Contribute of a Green Roof to the Sustainable use of Natural Resources in a Life Cycle Approach. *Agriculture and Agricultural Science Procedia*. 2016 Jan 1;8:646–56.
73. Hong T, Kim J, Koo C. LCC and LCCO2 analysis of green roofs in elementary schools with energy saving measures. *Energy and Buildings*. 2012 Feb;45:229–39.
74. Smetana SM, Crittenden JC. Sustainable plants in urban parks: A life cycle analysis of traditional and alternative lawns in Georgia, USA. *Landscape and Urban Planning*. 2014 Feb 1;122:140–51.
75. Cubi E, Zibin NF, Thompson SJ, Bergerson J. Sustainability of Rooftop Technologies in Cold Climates: Comparative Life Cycle Assessment of White Roofs, Green Roofs, and Photovoltaic Panels. *Journal of Industrial Ecology*. 2016;20(2):249–62.

76. El Bachawati M, Manneh R, Belarbi R, Dandres T, Nassab C, El Zakhem H. Cradle-to-gate Life Cycle Assessment of traditional gravel ballasted, white reflective, and vegetative roofs: A Lebanese case study. *Journal of Cleaner Production*. 2016 Nov 20;137:833–42.
77. Strohbach MW, Arnold E, Haase D. The carbon footprint of urban green space—A life cycle approach. *Landscape and Urban Planning*. 2012 Feb 1;104(2):220–9.
78. Saiz S, Kennedy C, Bass B, Pressnail K. Comparative Life Cycle Assessment of Standard and Green Roofs. *Environmental Science & Technology*. 2006 Jul;40(13):4312–6.

## Abbreviazioni ed acronimi

|     |                          |
|-----|--------------------------|
| DOE | Department Of Energy     |
| TFM | Transfer Function Method |
| HB  | Heat Balance             |
| LCA | Life Cycle Assessment    |
| GWP | Global Warming Potential |
| LCI | Life Cycle Inventory     |
| LWP | Local Warming Potential  |