

Ricerca di Sistema elettrico



Ottimizzazione delle tecnologie verdi d'involucro finalizzata al risparmio energetico degli edifici e alla riduzione del surriscaldamento urbano (LA2.2)

T. Susca, F. Zanghirella

Ottimizzazione delle tecnologie verdi d'involucro finalizzata al risparmio energetico degli edifici e alla riduzione del surriscaldamento urbano

Ottimizzazione delle tecnologie verdi d'involucro finalizzata al risparmio energetico degli edifici e alla riduzione del surriscaldamento urbano (LA2.2)

T. Susca, F. Zanghirella (ENEA)

Con il contributo di Vincenzo del Fatto e Giovanni Puglisi (ENEA)

Dicembre 2024

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica -ENEA Piano Triennale di Realizzazione 2022-2024

Obiettivo: *Decarbonizzazione*

Progetto: Edifici ad alta efficienza per la transizione energetica

Linea di attività: 2.2

Responsabile del Progetto: Giovanni, Puglisi, ENEA

Responsabile del Work Package: Giovanni, Puglisi, ENEA

Responsabile Linea di Attività: ENEA

Mese inizio previsto: 19

Mese inizio effettivo: 19

Mese fine previsto: 36

Mese fine effettivo: 36

Indice

1	Risultati attesi	5
2	Risultati ottenuti.....	6
3	Prodotti attesi	7
4	Prodotti sviluppati	8
5	Analisi degli scostamenti su attività e risultati.....	9
6	Sintesi delle attività svolte	10
7	Dettaglio delle attività svolte.....	11
7.1	Modellazioni e simulazioni ENVI-met.....	11
7.2	Modellazioni e simulazioni EnergyPlus	17
7.3	Ottimizzazione delle TVI.....	25
8	Contributo delle eventuali consulenze alle attività sopra descritte.....	28
9	Pubblicazioni scientifiche.....	29
10	Eventi di disseminazione	30

Indice delle figure

Figura 1 – Profilo medio orario delle temperature per il mese più caldo per le città selezionate. Fonte: [2].....	14
Figura 2 – Flusso di lavoro applicato per lo sviluppo di strumenti predittivi del potenziale di adattamento degli scenari basati sull'applicazione di TVI. Fonte: [6].....	16
Figura 3 – Variazioni delle temperature dell'aria derivanti dalle simulazioni ENVI-met per casi di applicazione di EGR (a), GF (b) e LW (c). Fonte: [2].....	16
Figura 4 – Modellazione dell'area urbana di Roma in DesignBuilder	18
Figura 5 – Modellazione dell'area urbana di Bari in DesignBuilder	18
Figura 6 – Modellazione dell'area urbana di Firenze in DesignBuilder.....	19
Figura 7 – Modellazione di un infisso in DesignBuilder	19
Figura 8 – Elementi costruttivi modellati in DesignBuilder.....	20
Figura 9 – Modellazione della parete esterna MCV01(1) in Design Builder	20
Figura 10 – Modellazione del EGR in DesignBuilder	21
Figura 11 – Modellazione del solaio contro-terra in DesignBuilder	21
Figura 12 – Dettaglio dell'edificio di Roma simulato energeticamente in EnergyPlus con l'attribuzione dei componenti orizzontali e verticali	22
Figura 13 – Dettaglio dell'edificio di Bari simulato energeticamente in EnergyPlus con l'attribuzione dei componenti orizzontali e verticali	22
Figura 14 – Dettaglio dell'edificio di Firenze simulato energeticamente in EnergyPlus con l'attribuzione dei componenti orizzontali e verticali	23
Figura 15 – Confronto tra il fabbisogno di energia utile di riscaldamento e raffrescamento per il caso di studio dell'edificio selezionato nell'area urbana di Roma per il caso baseline, e gli scenari con applicazione, rispettivamente, di EGR, GF e LW.....	24
Figura 16 – Confronto tra il fabbisogno di energia utile di riscaldamento e raffrescamento per il caso di studio dell'edificio selezionato nell'area urbana di Bari per il caso baseline, e gli scenari con applicazione, rispettivamente, di EGR, GF e LW.....	24
Figura 17 – Confronto tra il fabbisogno di energia utile di riscaldamento e raffrescamento per il caso di studio dell'edificio selezionato nell'area urbana di Firenze per il caso baseline, e gli scenari con applicazione, rispettivamente, di EGR, GF e LW.....	25
Figura 18 – Locandina dell'evento organizzato da ENEA e dal Comune di Bolzano	30
Figura 19 – Locandina del webinar di presentazione della guida a "Tetti e pareti verdi per gli edifici" organizzato da ENEA	31
Figura 20 – Locandina dello special issue organizzato per la rivista Atmosphere (MDPI).....	32

Indice delle tabelle

Tabella 1 – Caratteristiche delle superfici urbane utilizzate per la modellazione ENVI-met. Fonte: Materiali Supplementari [2].....	12
Tabella 2 – Fabbisogno di energia utile di riscaldamento e raffrescamento mensile normalizzata [kWh/m ²] con applicazione dei limiti di accensione per le diverse aree climatiche	25
Tabella 3 – Variazioni percentuali del fabbisogno di energia utile di riscaldamento e raffrescamento rispetto agli scenari baseline con applicazione dei limiti di accensione per le diverse aree climatiche.....	26

1 Risultati attesi

Di seguito si riporta per punti il testo del capitolato relativo ai risultati attesi per la LA2.2.

- Ci si attende di ottenere una stima degli effetti degli scenari di mitigazione, basati sull'applicazione delle tecnologie verdi d'involucro analizzate a edifici inseriti in diverse tipologie di tessuto urbano, sui consumi energetici degli edifici tipo mediante l'utilizzo di un software di simulazione energetica in regime dinamico implementato nella LA 2.7.
- Similmente, ci si attende di ottenere, mediante l'esecuzione di simulazioni ENVI-met, una stima dell'effetto dell'applicazione di scenari basati sull'utilizzo delle tecnologie verdi d'involucro analizzate, in termini di riduzione del surriscaldamento urbano estivo.
- Un ulteriore risultato atteso è l'ottimizzazione delle configurazioni delle tecnologie verdi d'involucro analizzate. L'ottimizzazione verrà eseguita basandosi sulle stime del potenziale di risparmio energetico e di mitigazione dell'isola di calore urbana in relazione ai parametri analizzati.

2 Risultati ottenuti

I risultati ottenuti nella presente LA possono essere sintetizzati come segue:

- Per le aree urbane delle città selezionate nella precedente LA, ossia Roma, Bari e Firenze, sono stati definiti, modellati e simulati, per una giornata tipica estiva, 281 scenari ENVI-met comprendenti scenari baseline, di adattamento all'isola di calore urbana e di validazione.
- I dati di output delle simulazioni ENVI-met sono stati estratti ad un'altezza pedonale (i.e., 1.5 m dal suolo) e per l'intera area urbana nelle ore di maggiore magnitudo dell'isola di calore urbana: le ore 14.00. È stata calcolata la media della variazione della temperatura dell'aria tra gli scenari base e quelli di adattamento per le intere aree urbane selezionate. Gli scenari baseline sono stati validati con temperature registrate in situ da centraline meteorologiche ed è stata verificata la bontà delle simulazioni mediante il confronto degli errori con i dati di letteratura.
- Utilizzando i risultati delle simulazioni ENVI-met, è stato sviluppato uno strumento predittivo per la mitigazione dell'isola di calore urbana mediante l'applicazione delle tre tecnologie verdi d'involucro: tetto verde estensivo, facciata verde e living wall (si veda la pubblicazione scientifica: Susca, T., Iaria, J., Zanghirella, F. (2024) Development of predictive indices for evaluating the UHI adaptation potential of green roof- and wall-based scenarios in the Mediterranean climate, Nature, Scientific Reports)
- Utilizzando il software EnergyPlus e il modulo sviluppato dal co-beneficiario Politecnico di Torino nella LA2.7, sono stati simulati in regime dinamico tre edifici. In totale sono stati simulati 12 scenari, di cui tre relativi allo status quo, tre con l'applicazione di un tetto verde, tre con l'applicazione di facciate verdi e tre con l'applicazione di living wall.
- I risultati relativi alle simulazioni EnergyPlus sono stati confrontati con i risultati relativi ai corrispondenti scenari sviluppati e simulati con ENVI-met e sono stati utilizzati per l'ottimizzazione delle tecnologie verdi d'involucro per i 12 scenari energetici sviluppati.

3 Prodotti attesi

- Rapporto tecnico.

4 Prodotti sviluppati

Per la presente LA è stato sviluppato un rapporto tecnico contenente:

- i risultati di 281 simulazioni ENVI-met di scenari baseline, di adattamento all'isola di calore urbana e di validazione che sono stati utilizzati per lo sviluppo di strumenti predittivi della valutazione ex-ante dell'adattamento all'isola di calore urbana, mediante l'applicazione di scenari di adattamento basati su una singola tecnologia verde d'involucro: tetto verde estensivo, facciata verde o living wall.
- tali strumenti non erano previsti dal capitolato.
- utilizzando il software EnergyPlus e un modulo sviluppato dal co-beneficiario Polito per la valutazione dell'effetto dell'installazione di pareti verdi sugli edifici, sono stati simulati 12 scenari energetici. Nello specifico, per ciascuna delle tre aree urbane selezionate, è stato individuato un edificio e per quest'edificio sono stati sviluppati quattro scenari: scenario baseline (i.e., scenario relativo allo status quo), scenario dello status-quo con applicazione di un tetto verde estensivo, scenario dello status-quo con applicazione di facciate verdi sull'edificio selezionato e, infine, scenario dello status-quo con applicazione di living wall sull'edificio selezionato.
- Sono stati confrontati i risultati energetici e microclimatici per i 12 scenari descritti al punto precedente e i corrispondenti scenari microclimatici. Inoltre, per ciascuno scenario che prevede l'applicazione di una tecnologia verde d'involucro, si è valutata la combinazione che consente di ottenere i maggiori vantaggi microclimatici e ambientali in estate. Inoltre, per quanto riguarda le analisi energetiche, si è indagato, mediante l'utilizzo del software EnergyPlus e di un modulo sviluppato dal co-beneficiario Politecnico di Torino, quali modifiche apportare alle tecnologie verdi d'involucro applicate, per la valutazione dell'effetto dell'installazione di pareti verdi sugli edifici, per ottimizzarne i benefici sia in inverno sia in estate.
- Oltre agli obiettivi previsti dal capitolato, è stata avviata una collaborazione per la redazione di un articolo scientifico con il co-beneficiario Politecnico di Torino.

5 Analisi degli scostamenti su attività e risultati

Dal punto di vista tecnico, la LA2.2 non presenta nessuno scostamento, avendo svolto le attività e raggiunto e superato i risultati previsti da capitolato.

Il rischio riportato nel capitolato, per questa LA, non si è verificato, dal momento che il co-beneficiario Politecnico di Torino ha sviluppato un modulo per la stima dell'effetto, in termini energetici, dell'applicazione di facciate verdi e living wall sulle pareti degli edifici.

6 Sintesi delle attività svolte

Il progetto ha l'obiettivo di valutare l'effetto degli scenari di adattamento all'isola di calore urbana basati sull'applicazione di tecnologie verdi d'involucro (TVI), sulla temperatura urbana estiva e sui consumi energetici annuali, nonché di ottimizzare le TVI applicate.

L'obiettivo generale è stato raggiunto mediante il conseguimento dei seguenti sotto-obiettivi:

- Sviluppo di 281 simulazioni ENVI-met relative a tre aree urbane, ciascuna situata in una città appartenente all'area climatica Csa (clima mediterraneo);
- Sviluppo e simulazione di 12 scenari energetici realizzati con EnergyPlus e con il modulo implementato dal co-beneficiario PoliTo;
- Sviluppo di uno strumento predittivo per valutare l'effetto dell'implementazione di scenari di adattamento all'isola di calore urbana (in aggiunta a quanto previsto dal capitolato);
- Confronto dei risultati relativi alla simulazione dei 12 scenari energetici con i corrispondenti scenari microclimatici, al fine di ottimizzare le TVI.

7 Dettaglio delle attività svolte

7.1 Modellazioni e simulazioni ENVI-met

Per la modellazione e la simulazione microclimatica delle tre aree urbane individuate (Roma, via Lanciani; Bari, viale Kennedy; Firenze Gavinana), sono state raccolte le informazioni sui materiali, caratteristiche fisiche, stratigrafie dei manufatti urbani e vegetazione mediante ispezione visiva in Google maps. Le tre aree sono state scelte, tra l'altro, per essere caratterizzate da tre tipologie di tessuto urbano: puntiforme (Roma), lineare (Bari) e chiuso (Firenze). In base alle caratteristiche morfologiche degli edifici, sono stati ipotizzati il periodo di costruzione e la tipologia costruttiva; di conseguenza, sono stati ipotizzati i pacchetti di chiusura verticali e orizzontali degli edifici e i materiali che li costituiscono così come le caratteristiche termofisiche, basandosi sulle stratigrafie proposte nel rapporto tecnico UNI/TR 11552:2014 e nel rapporto [1]. Le caratteristiche termofisiche degli elementi di involucro sono riportate in Tabella 1.

Tabella 1 – Caratteristiche delle superfici urbane utilizzate per la modellazione ENVI-met. Fonte: Materiali Supplementari [2]

Building shell opaque component	Layer	s	ρ	c	λ	R	U	Y_{is}
		[cm]	[kg·m ⁻³]	[J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹]	[W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]	[m ² ·K·W ⁻¹]	[W·m ⁻² ·K ⁻¹]	[W·m ⁻² ·K ⁻¹]
CIN02(1) Sloped wooden roof. Insulated	Wooden deck	3	550	1600	0.15	-	1.18	-
	Polystyrene insulation panel	2	30	1220	0.045	-		
	Tiles	2	2000	840	0.99	-		
CIN03(1) Sloped brick roof. Insulated	Internal plaster	2	1400	1000	0.70	-	0.60	0.168
	Slab	16	1800	1000	-	0.33		
	Reinforced concrete	4	2400	1000	-	-		
	Cement mortar	2	2000	1000	-	-		
	Polystyrene insulation panel	5	35	1220	0.045	-		
	Bituminous membrane	0.4	1200	1000	0.17	-		
	Tiles	2	2000	840	0.99	-		
CIN03(2) Sloped brick roof. Insulated	Internal plaster	2	1400	1000	0.70	-	0.30	0.075
	Slab	16	1800	1000	-	0.33		
	Reinforced concrete	4	2400	1000	-	-		
	Cement mortar	2	2000	1000	-	-		
	Polyurethane insulating panel	7	35	1400	0.026	-		
	Bituminous membrane	0.4	1200	1000	0.17	-		
	Tiles	2	2000	840	0.99	-		
CIN04(1) Sloped brick roof. Not insulated. With tiles	Internal plaster	2	1400	1000	0.70	-	1.79	-
	Slab	16	1800	1000	-	0.33		
	Reinforced concrete	4	2400	1000	-			
	Cement mortar	2	2000	1000	-			
	Tiles	2	2000	840	0.99	-		
CIN04(2) Sloped brickroof. Not insulated. With metal plate	Internal plaster	2	1400	1000	0.70	-	1.79	-
	Slab	16	1800	1000	0.66	0.33		
	Reinforced concrete	4	2400	1000	0.58			
	Cement mortar	2	2000	1000	1.40			
	Metal plate	0.1	7800	450	52	-		
CIN05(1) Sloped wooden roof, Not insulated. With tiles	Wooden deck	3	550	1600	0.15	-	2.50	-
	Tiles	2	2000	840	0.99	-		
CIN05(2) Sloped wooden roof. Not insulated. With metal plate	Wooden deck	3	550	1600	0.15	-	2.50	-
	Metal plate	0.1	7800	450	52	-		
COP01(1)	Internal plaster	2	1400	1000	0.70	-	1.74	-

Plain brick roof Not insulated. With tiles	Slab	16	900	1000	0.66	0.33		
	Reinforced concrete	4	2400	1000	0.58			
	Cement mortar	2	2000	1000	1.40			
	Concrete blocks	2	2000	1000	1.06	-		
	Bituminous membrane	0.4	1200	1000	0.17	-		
COP01(2) Plain brick roof. Not insulated. With metal plate	Internal plaster	2	1400	1000	0.70	-	1.74	1
	Slab	16	900	1000	0.66	0.33		
	Reinforced concrete	4	2400	1000	0.58			
	Cement mortar	2	2000	1000	1.40			
	Concrete blocks	2	2000	1000	1.06	-		
Metal plate	0.1	7800	450	52	-			
CV.20 Cavity wall with hollow bricks. Insulated	Internal plaster	2	1400	1000	0.70	-	0.59	0.269
	Hollow bricks	6	800	1000	-	0.15		
	Air gap	4		1006	-	0.18		
	Thermal insulation	4	30	1220	0.045	-		
	Hollow bricks	12	800	1000	-	0.29		
CV.27 Alveolar brick wall. Insulated	Internal plaster	2	1400	1000	0.70	-	0.34	0.059
	Alveolar bricks	25	800	1000	-	0.15		
	Polyurethane foam insulation	5	35	1400	0.023	-		
	External plaster	2	1400	1000	0.70	-		
F. CONT Curtain wall panel	Polycarbonate	2	1200	1200	0.20	-	3.90	3.3
MCO04(1) Cavity wall with exposed blocks. Not insulated	Internal plaster	2	1400	1000	0.70	-	1.14	0.433
	Hollow bricks	8	800	1000	-	0.2		
	Air gap	15		1006	-	0.18		
	Concrete blocks	15	1400	1000	0.50	-		
MCV01(1) Hollow brick cavity wall. Not insulated	Internal plaster	2	1400	1000	0.70	-	1.10	0.594
	Hollow bricks	8	800	1000	-	0.2		
	Air gap	16		1006	-	0.18		
	Hollow bricks	12	800	1000	-	0.625		
	External plaster	2	1800	1000	0.90	-		
MCV03(1) Solid brick masonry with cavities. Not insulated	Internal plaster	2	1400	1000	0.70	-	1.05	0.152
	Hollow bricks	8	800	1000	-	0.2		
	Air gap	4		1006	-	0.18		
	Solid bricks	25	1800	1000	0.72	-		
	External plaster	2	1800	1000	0.90	-		
MCV06(1) Cavity wall with hollow bricks and solid bricks on façade. Not insulated	Internal plaster	2	1400	1000	0.70	-	1.17	0.45
	Hollow bricks	12	800	1000	-	0.31		
	Air gap	14		1006	-	0.18		
	Solid bricks	12	1800	1000	0.72	-		

MPF01(1) Concrete wall. Not insulated	Internal plaster	1	1400	1000	0.70	-	1.63	0.599
	Concrete wall	25	1400	1000	0.58	-		
MPL01(1) Solid bricks wall. Not insulated	Internal plaster	2	1400	1000	0.70	-	1.34	0.136
	Solid bricks	38	1800	1000	0.72	-		
	External plaster	2	1800	1000	0.90	-		
MPL02(1) Solid brick wall. Exposed façade. Not insulated	Internal plaster	1.5	1400	1000	0.70	-	1.39	0.167
	Solid bricks	38	1800	1000	0.72	-		
MPL03(1) Semi-solid brick masonry. Not insulated	Internal plaster	2	1400	1000	0.70	-	1.18	0.423
	Brick blocks	25	1000	1000	.	0.625		
	External plaster	2	1800	1000	0.90	-		

La posizione e gli attributi geometrici degli edifici, come l'altezza, sono stati ottenuti tramite il Geoportale nazionale del Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare [3].

Infine, il database di ENVI-met è stato implementato con tetti verdi estensivi, facciate verdi e living wall. Per ciascuna tecnologia verde d'incolcro (TVI) sono stati considerati tre valori di indice di area fogliare (i.e., Leaf Area Index - LAI): 1.5, 3 e 5. Per ciascuna città, è stato scelto il mese più caldo dell'anno climatico tipico identificato dal Comitato Termotecnico Italiano che per Roma risulta essere luglio e per Bari e Firenze risulta essere agosto. Per i mesi più caldi sono stati considerati i profili orari medi mensili (Figura 1).

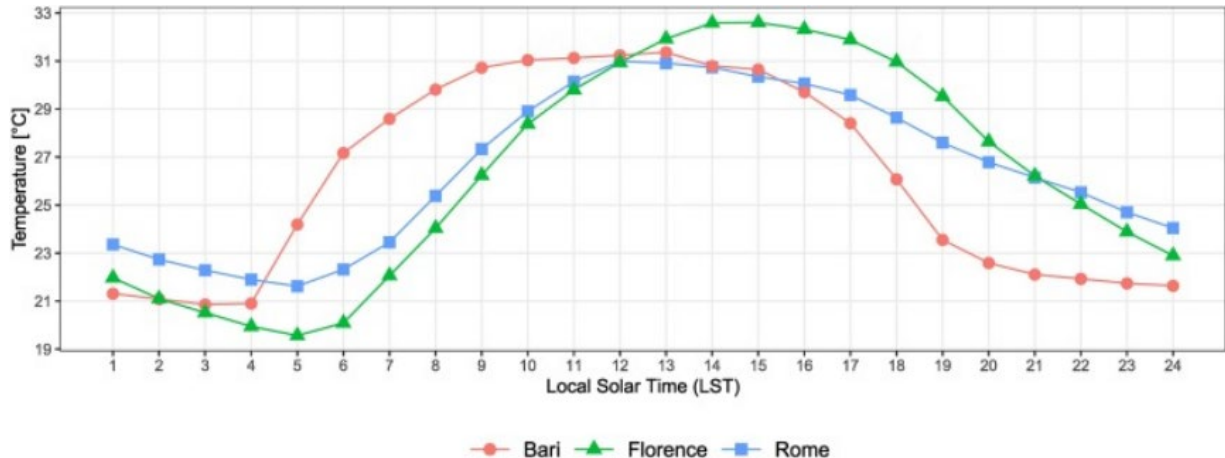


Figura 1 – Profilo medio orario delle temperature per il mese più caldo per le città selezionate. Fonte: [2]

Per le tre aree urbane, sono stati sviluppati gli scenari baseline riportanti lo status quo dell'area urbana e 281 scenari ottenuti modificando i tre parametri che più incidono nell'adattamento all'isola di calore urbana: altezza degli edifici (BH), tipo di TVI applicata (i.e., tetto verde estensivo - EGR, facciata verde - GF o living wall - LW), copertura percentuale del verde relativamente alla TVI applicata (COP) (i.e., 25%, 50%, 75% e 100%) e LAI (i.e., LAI1.5, LAI 3 e LAI5). L'altezza degli edifici è stata fatta variare in modo che la morfologia dell'area urbana potesse rientrare tra quelle maggiormente diffuse nelle aree più urbanizzate, cioè LCZ1-3. Pertanto, le altezze degli edifici utilizzate per le modellazioni sono state: 5m, 10m, 20m, 30m e 40m. Tutti gli scenari sviluppati e simulati sono riportati nei Materiali Supplementari in [2] e [4].

Le simulazioni sono state condotte utilizzando ENVI-met 4.4.6 e 5.1 con una griglia di 5m x 5m x 5m, per ottenere risultati accurati in un tempo computazionale di sei/otto ore per simulazione.

I risultati delle simulazioni sono stati utilizzati per verificare, per ciascuno scenario di adattamento, la variazione della temperatura dell'aria calcolata come media spaziale per le aree urbane selezionate (Figura 2 e Figura 3) e per sviluppare uno strumento predittivo della variazione della temperatura dell'aria a seguito dell'implementazione di scenari basati sull'applicazione di una TVI in aree urbane caratterizzate dal clima Csa.

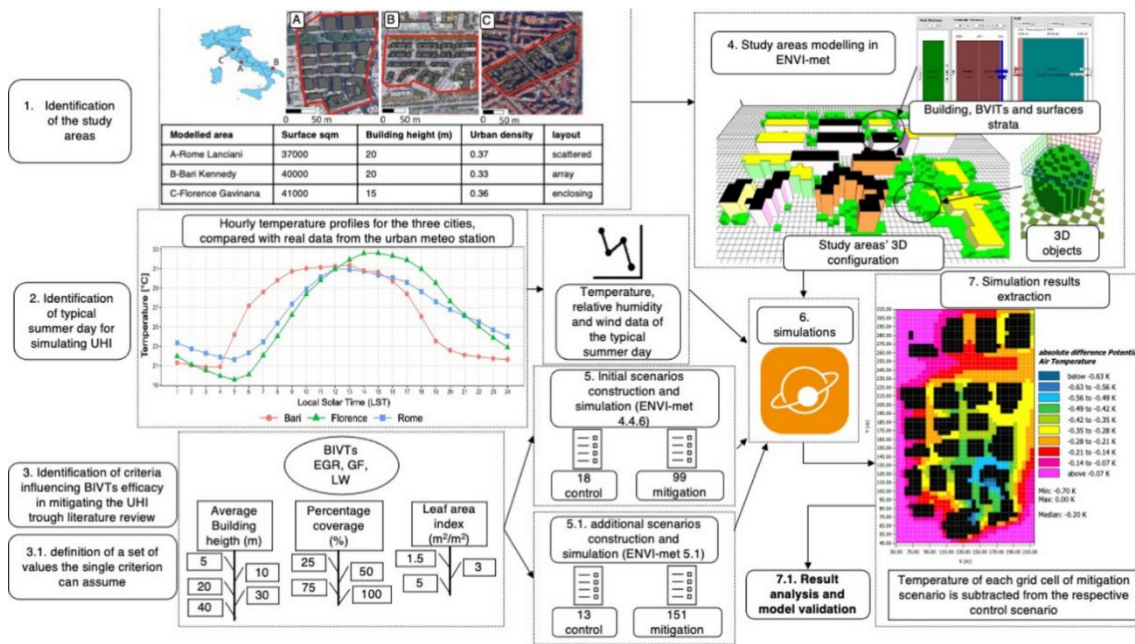


Figura 2 - Flusso di lavoro per lo sviluppo di strumenti predittivi del potenziale di adattamento degli scenari basati sull'applicazione di TVI. Fonte: [4]

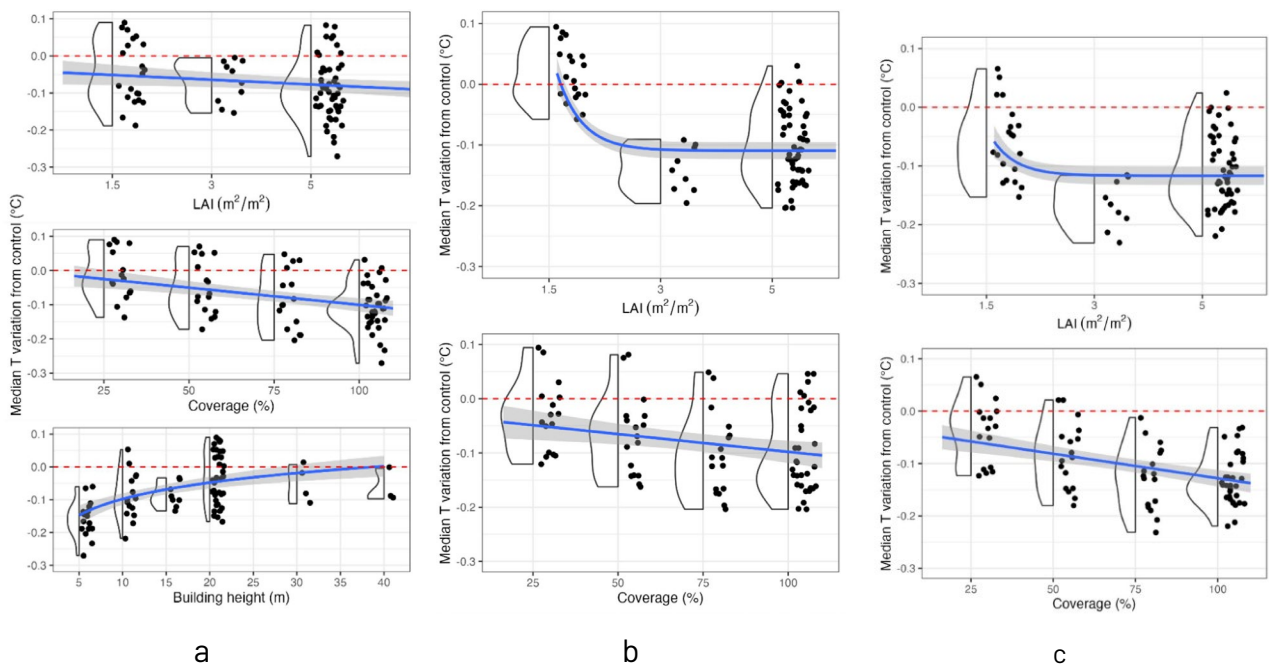


Figura 3 - Variazioni delle temperature dell'aria derivanti dalle simulazioni ENVI-met per casi di applicazione di EGR (a), GF (b) e LW (c). Fonte: [4]

Tali strumenti predittivi, uno per ciascuna TVI analizzata, non erano stati introdotti nel capitolato ma sono stati sviluppati a completamento del lavoro svolto e per fornire ai decisori politici uno strumento utile per la valutazione ex-ante di piani di adattamento all'isola di calore urbana. Sono stati utilizzati modelli di regressione lineare multipla per calcolare le relazioni tra la variazione media della temperatura dell'aria e BH, COP e LAI e ottenere gli indici predittivi.

Ne è risultato che, per EGR, GF e LW, le equazioni in grado di predire le variazioni di temperatura dell'aria sono le seguenti:

$$I_{EGR} = -0.0784 - 0.0016COP + 0.0722 \ln(BH) - 0.0177LAI \quad (1)$$

$$I_{GF} = -0.0269 - 0.0012COP + 123.3e^{-4.5 \cdot LAI} \quad (2)$$

$$I_{LW} = -0.0014COP + 67.55e^{-4.5 \cdot LAI} \quad (3)$$

Gli indici sviluppati risultano efficaci nel predire la variazione della temperatura dell'aria (per ulteriori approfondimenti si veda [4]), tuttavia, la loro bontà dipende largamente dalla precisione di ENVI-met. Il limite degli indici sviluppati risiede nel poter predire la variazione di temperatura dell'aria a causa dell'implementazione di piani basati sull'installazione di una sola tipologia di TVI. Si è indagato anche come la combinazione di diverse strategie di adattamento possa influire sulla variazione della temperatura dell'aria e ne è risultato che piani basati sull'implementazione di diverse strategie sono sicuramente più efficaci rispetto all'applicazione di una sola strategia (per ulteriori approfondimenti si veda [5]). Anche queste ultime valutazioni sono frutto di uno studio non presente in capitolato ma che è stato affrontato per fornire a pianificatori e ai cittadini informazioni utili per rendere le città maggiormente vivibili.

7.2 Modellazioni e simulazioni EnergyPlus

Per verificare quale TVI possa influenzare maggiormente il comportamento energetico degli edifici, sono stati sviluppati 12 scenari energetici. Per ciascuna area urbana selezionata è stato creato uno scenario baseline, insieme a scenari che prevedono l'applicazione di EGR, GF e LW.

Per ciascuna area urbana, è stato scelto un edificio reale da modellare e simulare. Gli edifici selezionati e il loro contesto edilizio sono stati modellati in DesignBuilder, e il comportamento energetico è stato simulato con EnergyPlus v23.2 (Figura 4-Figura 6). Ogni componente dell'edificio è stato modellato dal punto di vista termo-fisico (e.g., Figura 7-Figura 11) e associato agli edifici modellati (Figura 12-Figura 14).

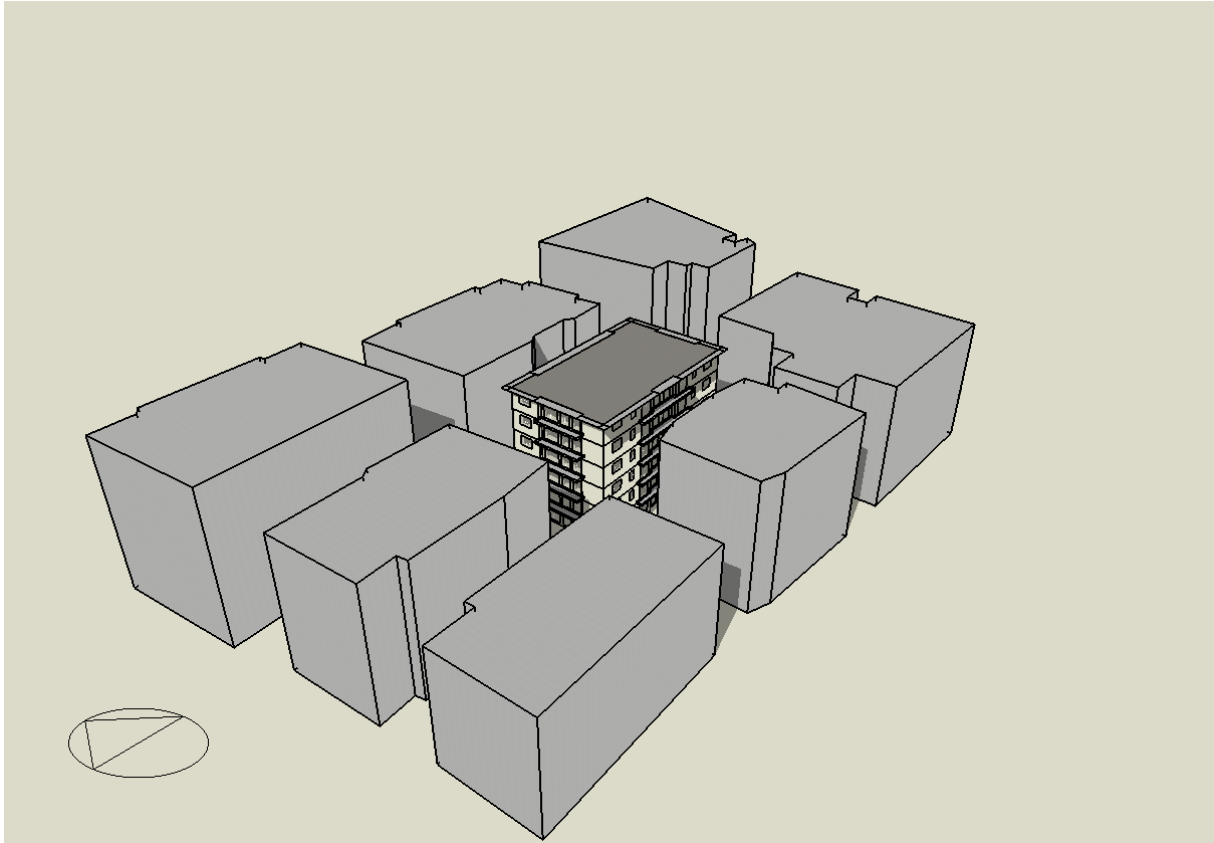


Figura 4 - Modellazione dell'area urbana di Roma in DesignBuilder

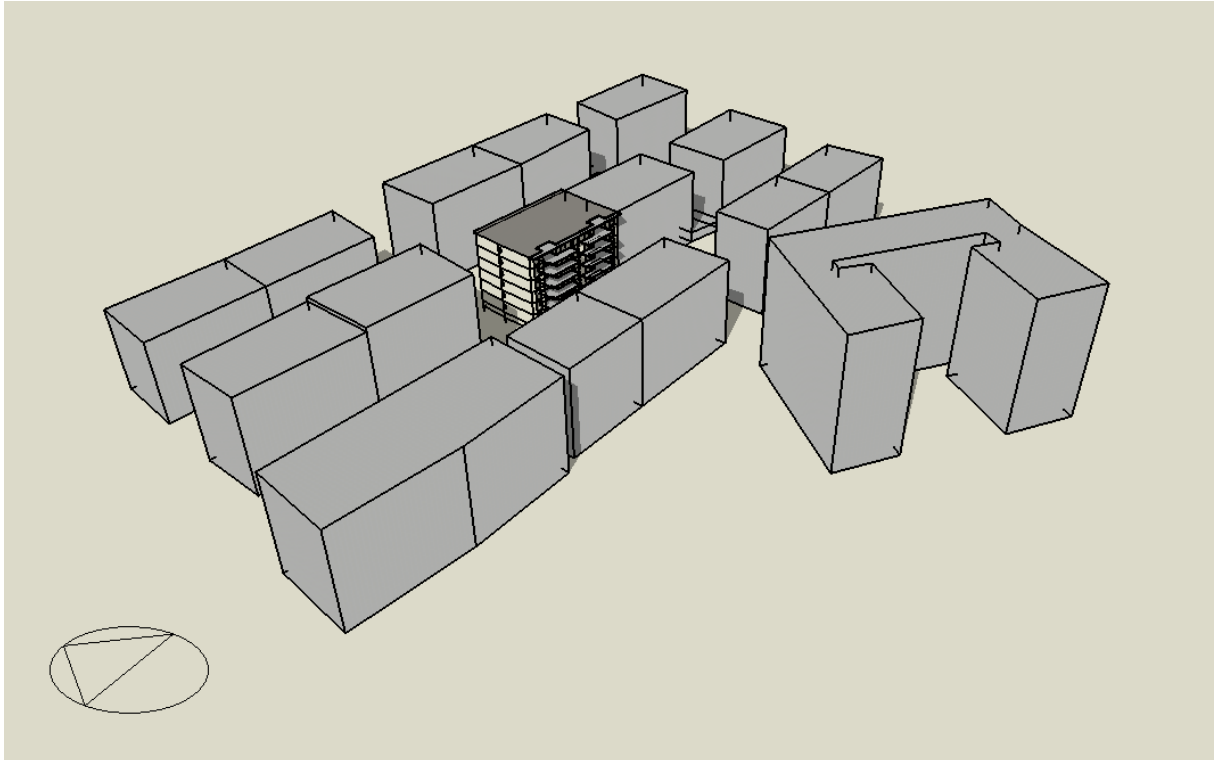


Figura 5 - Modellazione dell'area urbana di Bari in DesignBuilder

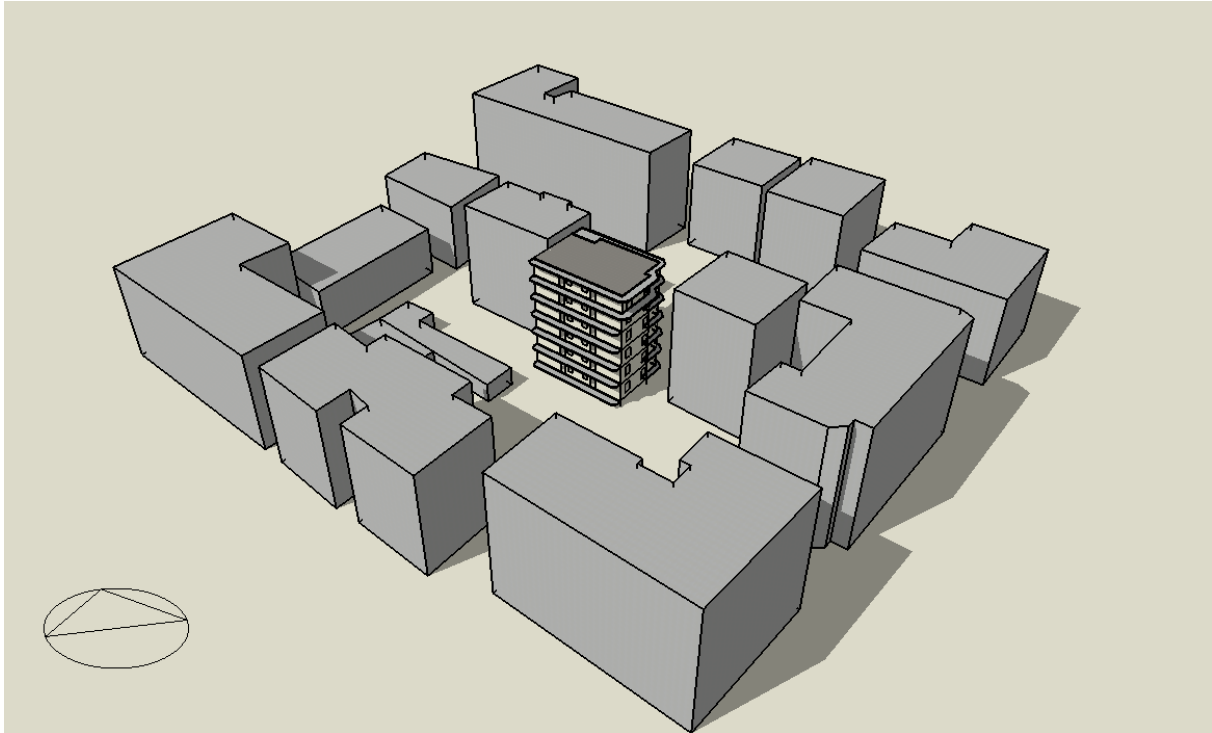


Figura 6 - Modellazione dell'area urbana di Firenze in DesignBuilder

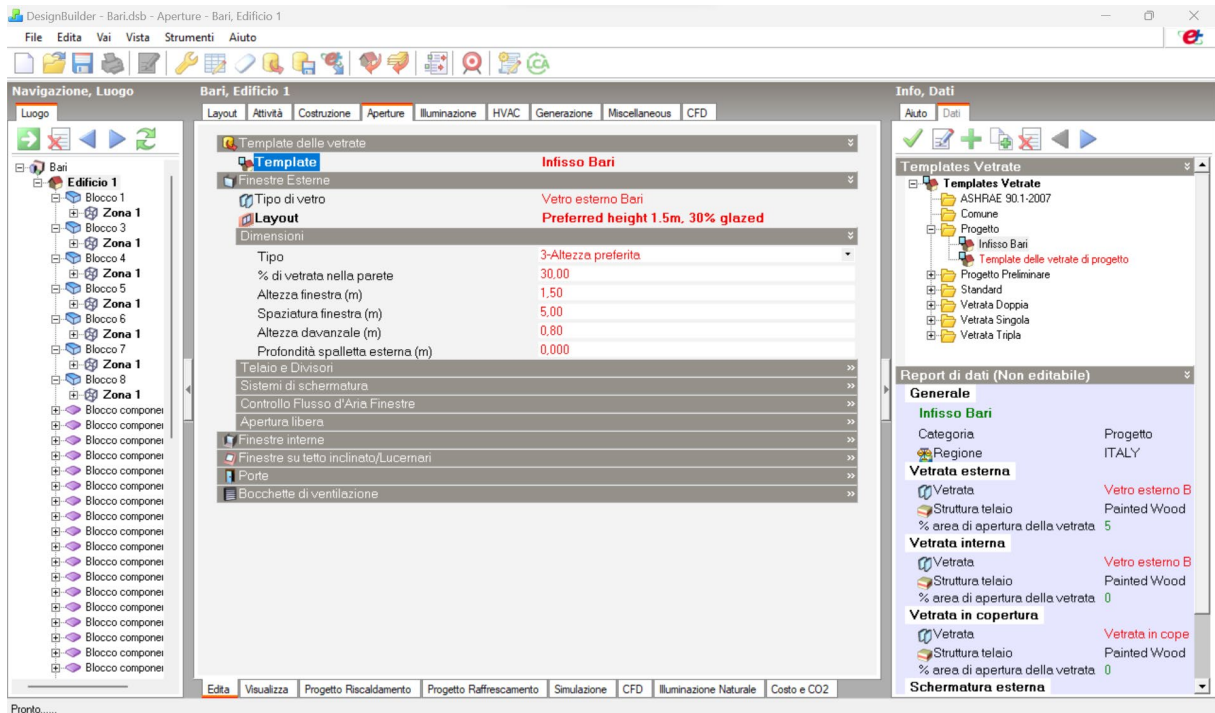


Figura 7 - Modellazione di un infisso in DesignBuilder

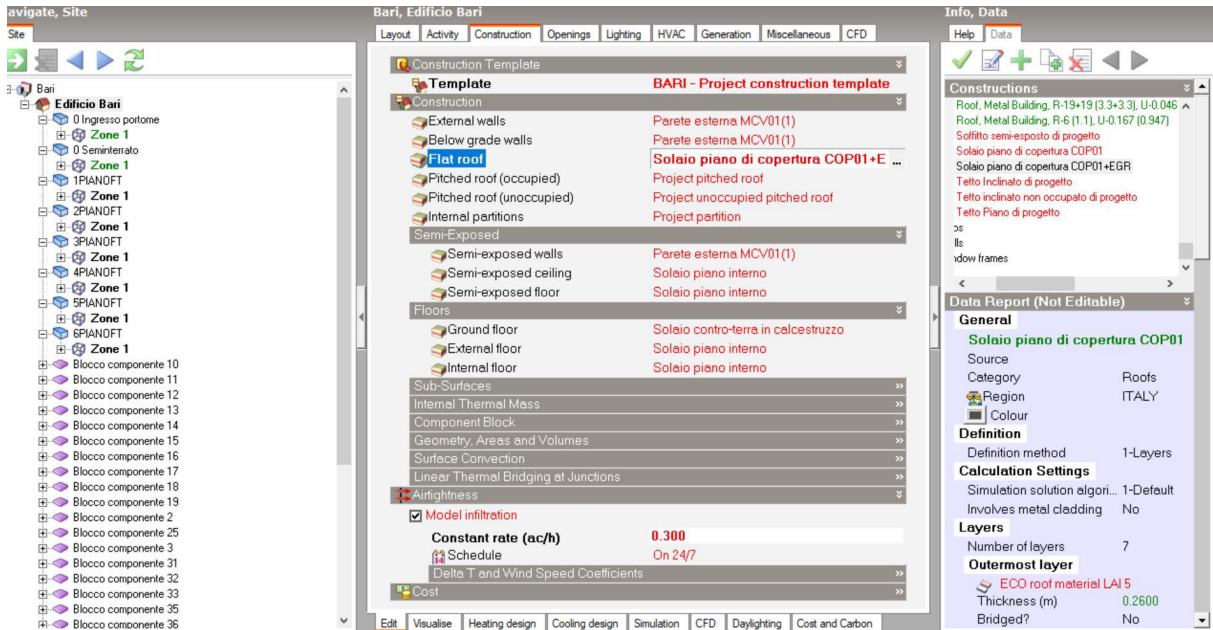


Figura 8 - Elementi costruttivi modellati in DesignBuilder

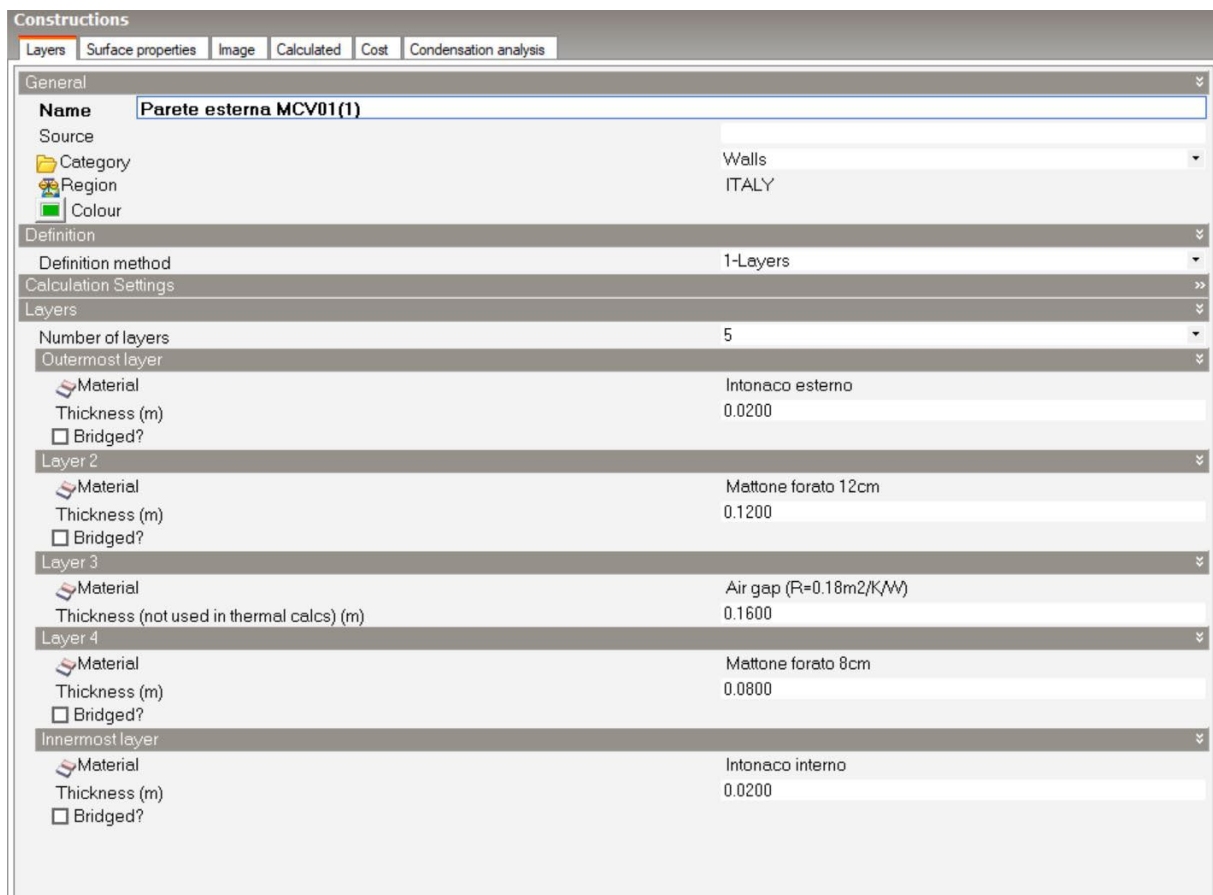


Figura 9 - Modellazione della parete esterna MCV01(1) in Design Builder

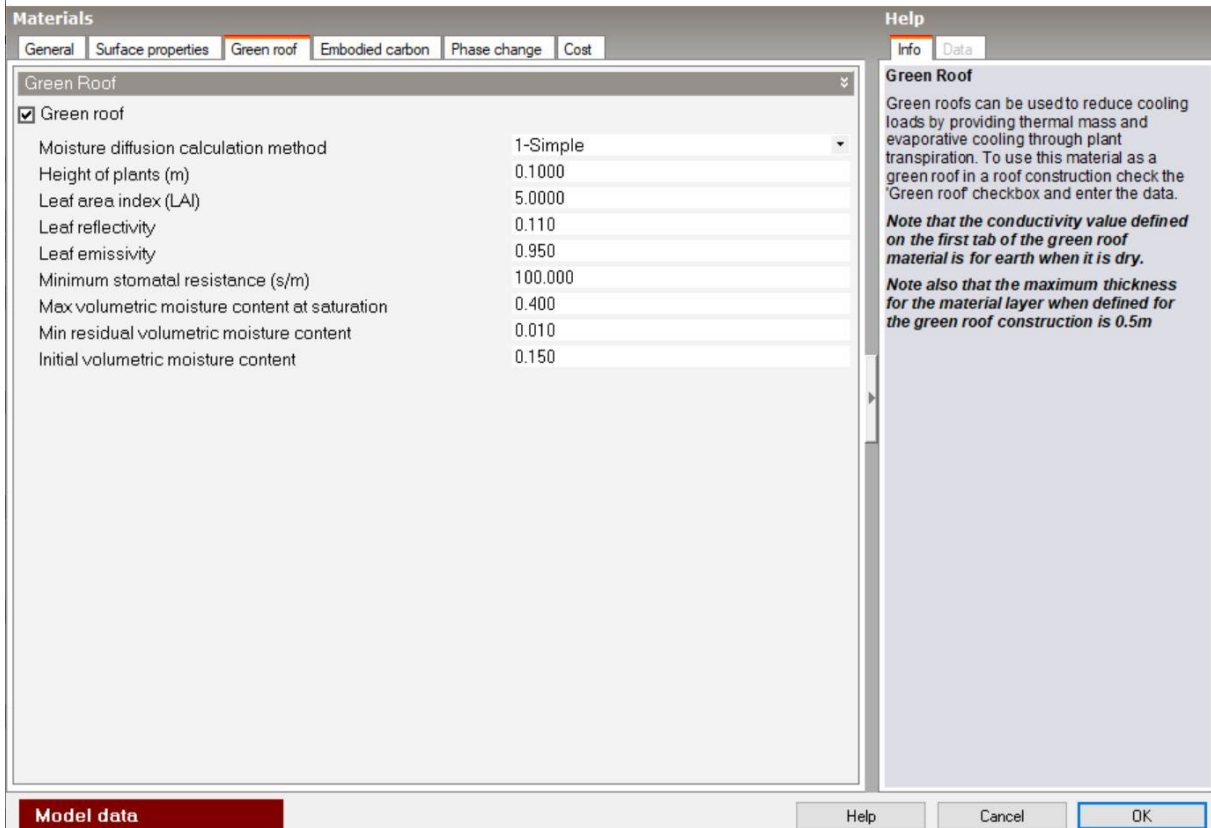


Figura 10 - Modellazione del EGR in DesignBuilder

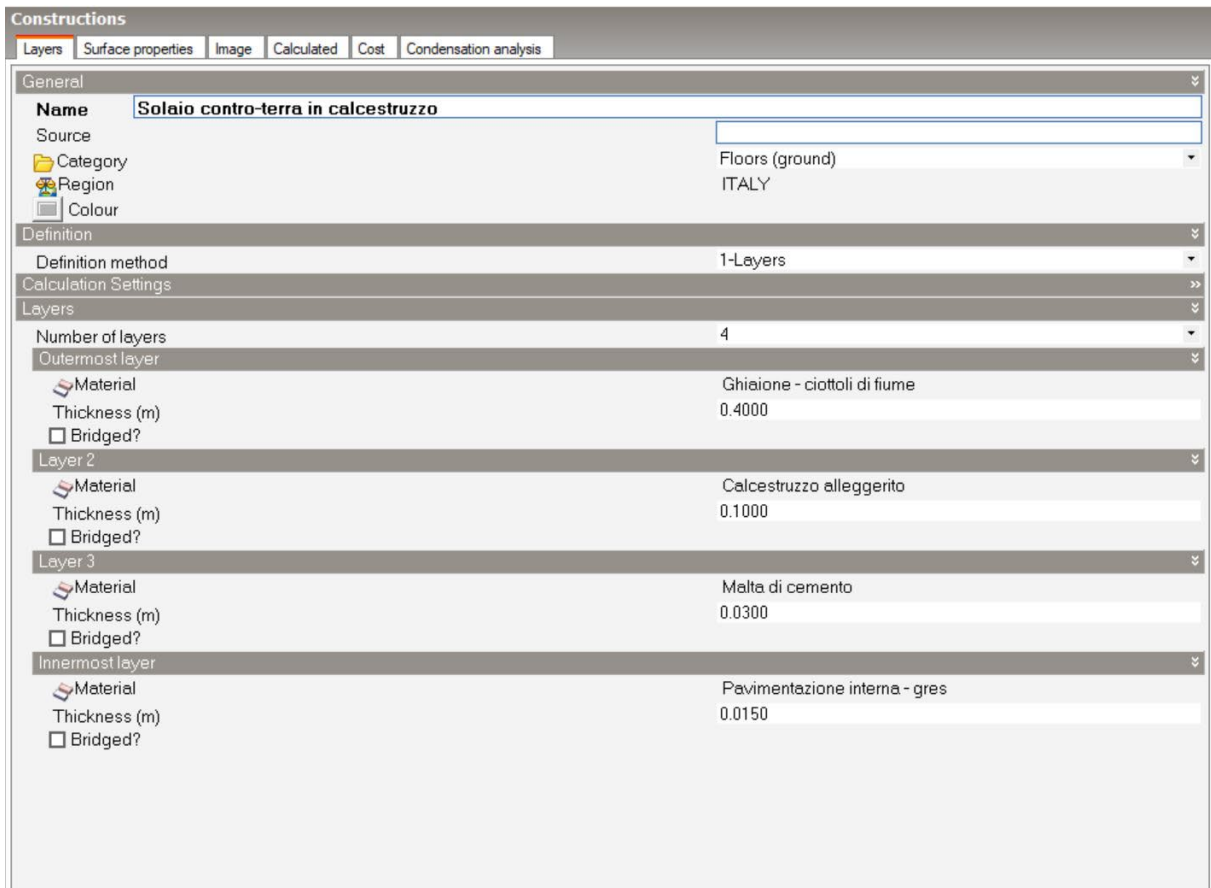


Figura 11 - Modellazione del solaio contro-terra in DesignBuilder



Figura 12 – Dettaglio dell'edificio di Roma simulato energeticamente in EnergyPlus con l'attribuzione dei componenti orizzontali e verticali

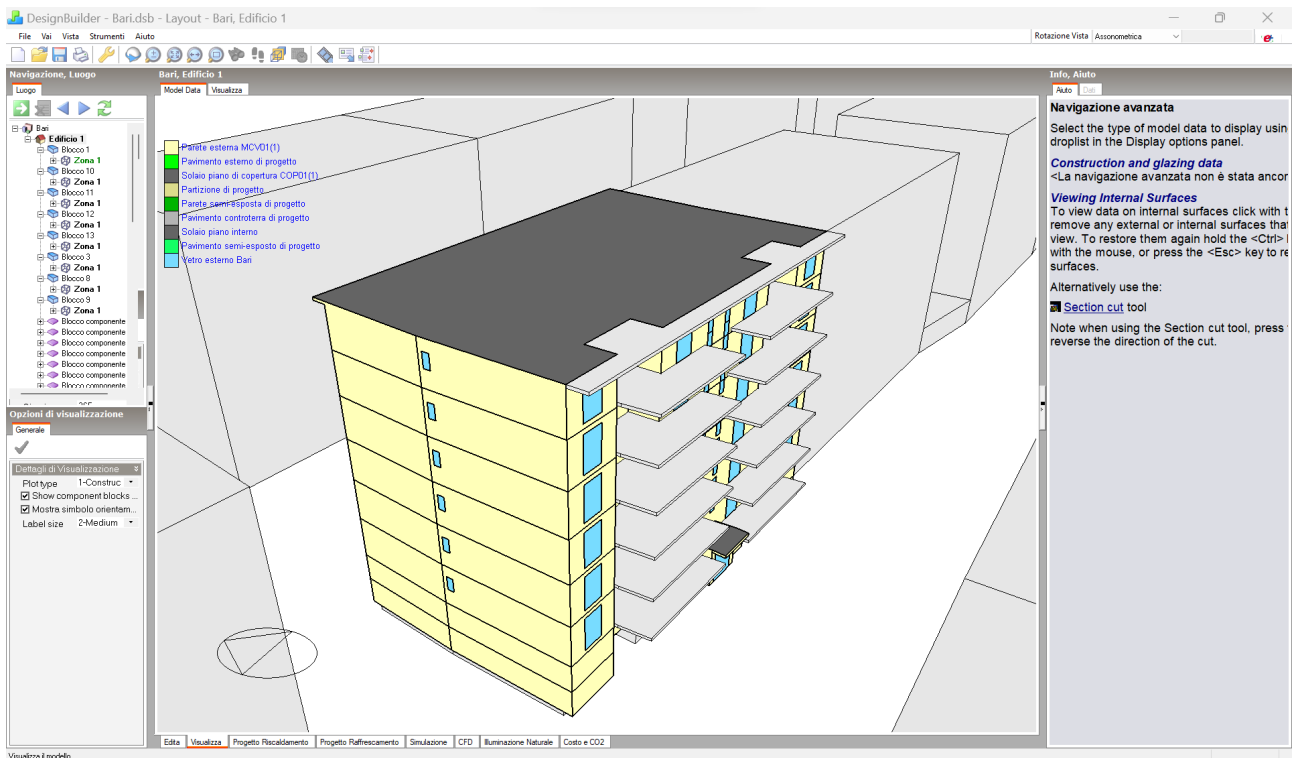


Figura 13 – Dettaglio dell'edificio di Bari simulato energeticamente in EnergyPlus con l'attribuzione dei componenti orizzontali e verticali

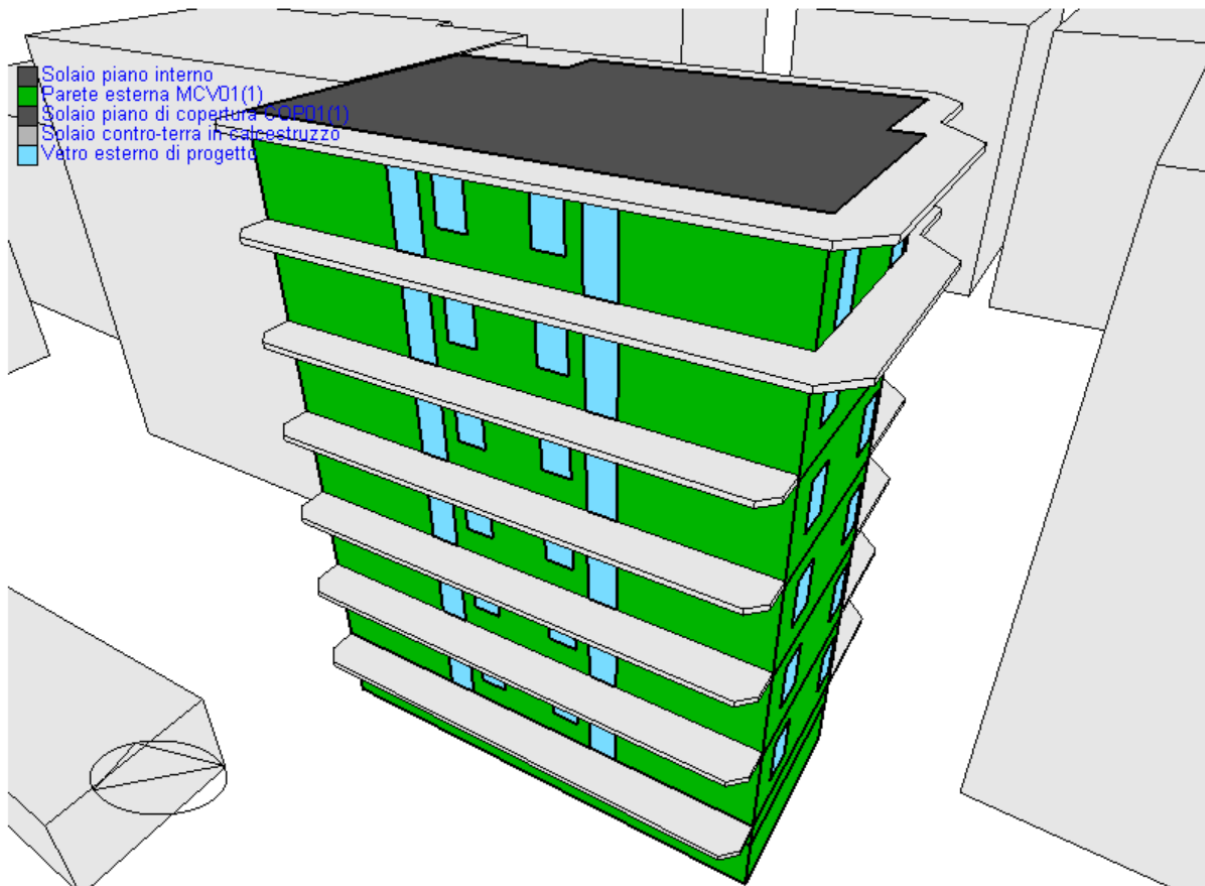


Figura 14 - Dettaglio dell'edificio di Firenze simulato energeticamente in EnergyPlus con l'attribuzione dei componenti orizzontali e verticali

I comportamenti energetici degli edifici sono stati simulati utilizzando i file climatici Test Reference Year per Bari e Firenze, e l'IWEC per Roma. L'applicazione delle pareti verdi è stata simulata tramite un modulo Python sviluppato dal co-beneficiario PoliTo durante la LA2.7. Il comportamento energetico delle TVI implementate sugli edifici è stato simulato con un LAI pari a 5 per tutto l'anno, ipotizzando la presenza di vegetazione perenne. Inoltre, sono stati impostati i set-point di 20°C per il riscaldamento e 25°C per il raffrescamento estivo. I sistemi di riscaldamento e raffrescamento sono stati ipotizzati funzionanti durante tutto l'anno, senza limitazioni temporali, come previsto dalle aree climatiche italiane.

La Figura 15, la Figura 16 e la Figura 17 mostrano l'energia utile di riscaldamento e di raffrescamento per i tre edifici nelle configurazioni baseline, con EGR, con GF e con LW. La simulazione energetica dell'edificio selezionato di Roma (Figura 15) evidenzia che il fabbisogno di energia utile per il riscaldamento invernale, riportato con valori positivi nel grafico, è pressoché invariato tra il caso base e l'applicazione di GF, mentre diminuisce con EGR e LW, poiché questi aumentano la resistenza termica dell'involucro edilizio. In estate, l'aumento di resistenza termica determina un aumento del fabbisogno di energia utile per il raffrescamento, riportata con valori negativi nel grafico.

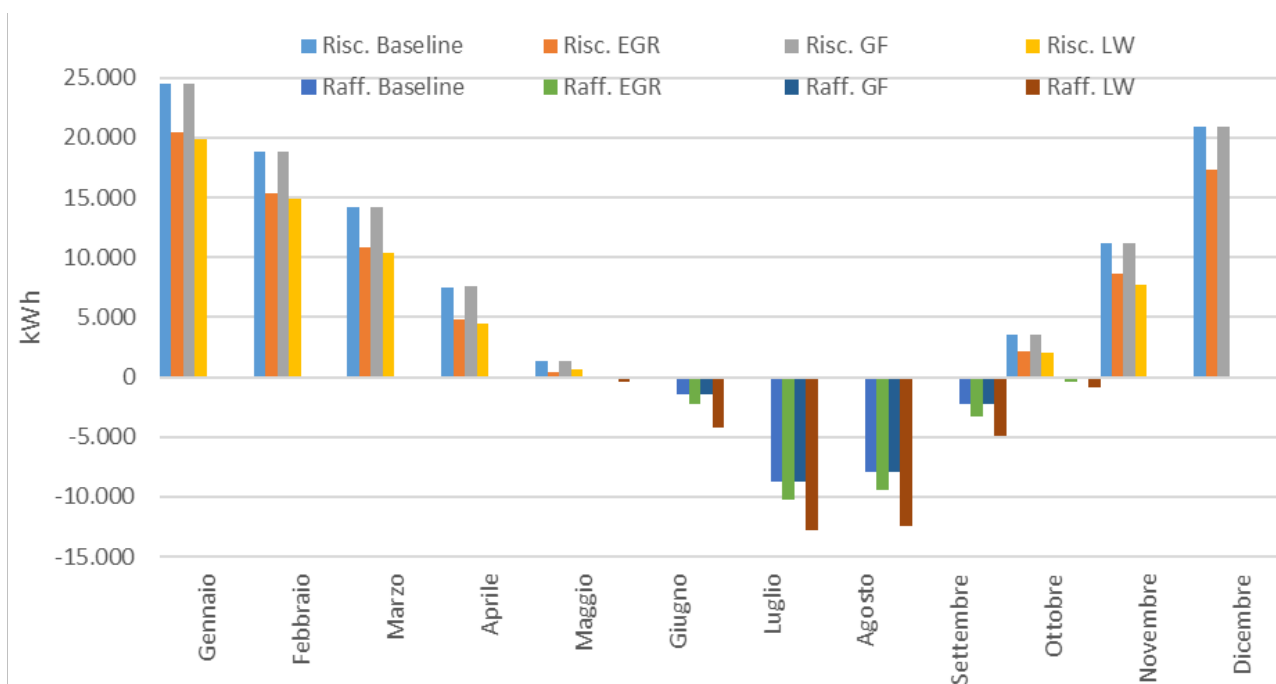


Figura 15 - Confronto tra il fabbisogno di energia utile di riscaldamento e raffrescamento per il caso di studio dell'edificio selezionato nell'area urbana di Roma per il caso baseline, e gli scenari con applicazione, rispettivamente, di EGR, GF e LW.

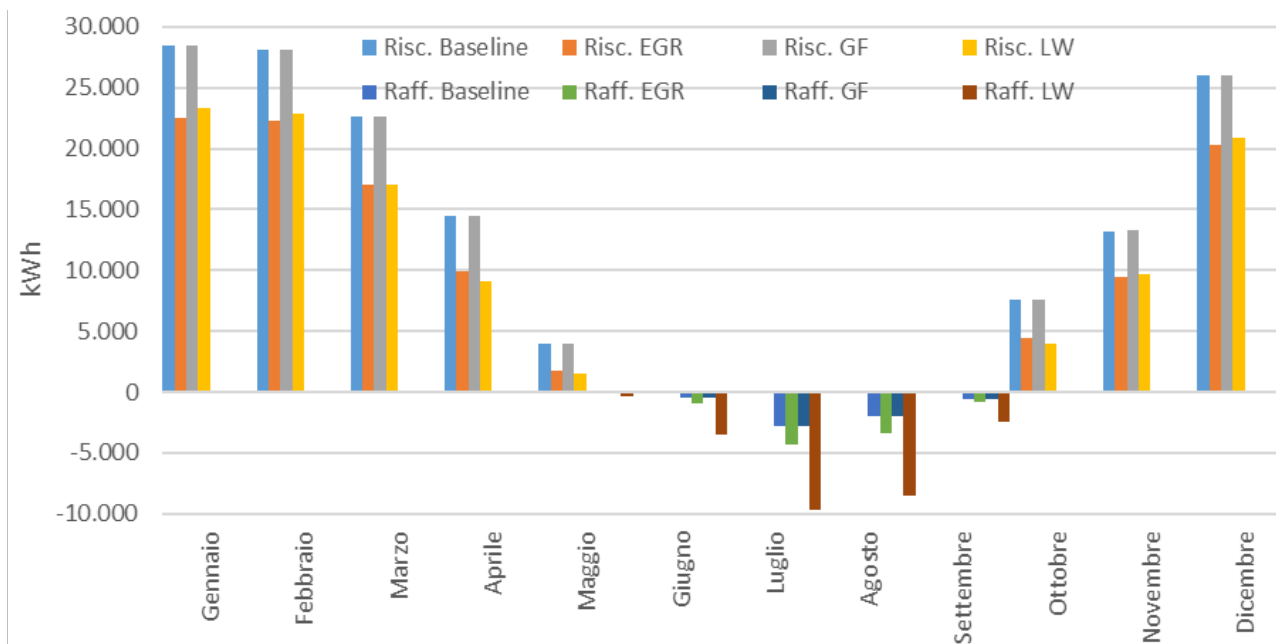


Figura 16 - Confronto tra il fabbisogno di energia utile di riscaldamento e raffrescamento per il caso di studio dell'edificio selezionato nell'area urbana di Bari per il caso baseline, e gli scenari con applicazione, rispettivamente, di EGR, GF e LW.

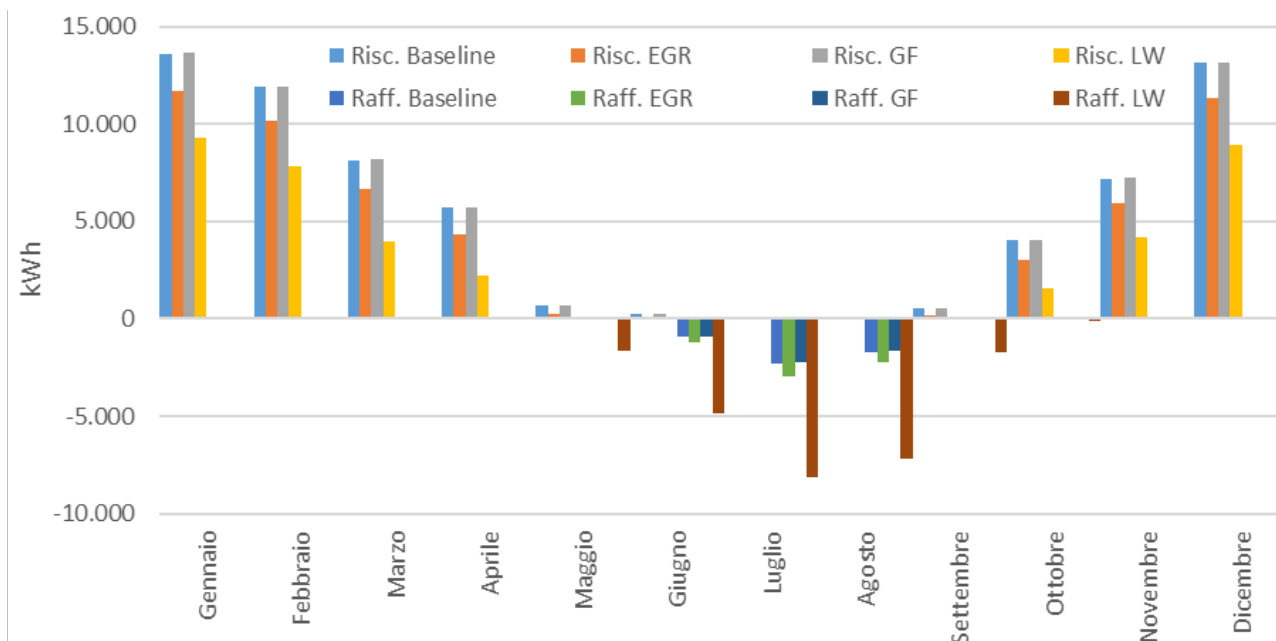


Figura 17 - Confronto tra il fabbisogno di energia utile di riscaldamento e raffrescamento per il caso di studio dell'edificio selezionato nell'area urbana di Firenze per il caso baseline, e gli scenari con applicazione, rispettivamente, di EGR, GF e LW.

Allo stesso modo, la Figura 16 mostra che per l'edificio selezionato a Bari, l'installazione di EGR e LW riduce il fabbisogno di riscaldamento in inverno e lo aumenta in estate. L'installazione di EGR comporta una leggera diminuzione del fabbisogno di energia utile per il riscaldamento. La Figura 17 mostra, infine, i fabbisogni energetici per l'edificio di Firenze.

I risultati sono stati anche normalizzati rispetto alla superficie dell'edificio e analizzati considerando i soli periodi effettivi di riscaldamento, secondo la normativa italiana (Tabella 2).

Tabella 2 - Fabbisogno di energia utile di riscaldamento e raffrescamento mensile normalizzata [kWh/m²] con applicazione dei limiti di accensione per le diverse aree climatiche

Mese	Bari Base	Bari EGR	Bari GF	Bari LW	Firenze Base	Firenze EGR	Firenze GF	Firenze LW	Roma Base	Roma EGR	Roma GF	Roma LW
Gennaio	10.75	8.51	10.75	8.78	15.25	13.08	15.26	10.39	10.53	8.80	10.54	8.54
Febbraio	10.61	8.42	10.61	8.63	13.32	11.36	13.33	8.77	8.09	6.59	8.09	6.38
Marzo	8.54	6.42	8.55	6.42	9.12	7.43	9.14	4.47	6.12	4.65	6.13	4.44
Aprile	0.00	0.00	0.00	0.00	3.72	2.89	3.73	1.46	2.09	1.41	2.10	1.31
Maggio	0.00	0.00	0.00	-0.13	-0.02	-0.04	-0.02	-1.87	-0.01	-0.03	-0.01	-0.20
Giugno	-0.17	-0.35	-0.16	-1.34	-1.07	-1.36	-1.05	-5.40	-0.61	-0.97	-0.60	-1.84
Luglio	-1.05	-1.61	-1.05	-3.66	-2.54	-3.30	-2.51	-9.15	-3.77	-4.43	-3.76	-5.51
Agosto	-0.75	-1.29	-0.75	-3.19	-1.89	-2.46	-1.87	-8.05	-3.44	-4.04	-3.43	-5.38
Settembre	-0.20	-0.31	-0.20	-0.92	-0.02	-0.04	-0.02	-1.93	-0.98	-1.41	-0.98	-2.13
Ottobre	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.09	-0.05	-0.15	-0.05	-0.37
Novembre	4.05	3.06	4.05	3.15	8.07	6.66	8.08	4.68	4.82	3.72	4.83	3.31
Dicembre	9.79	7.66	9.79	7.87	14.68	12.71	14.69	9.95	9.01	7.47	9.01	7.19
Totale riscaldamento	43.74	34.07	43.76	34.73	64.14	54.08	64.20	37.84	40.66	32.60	40.69	30.97
Totale raffrescamento	-2.17	-3.56	-2.16	-9.23	-5.53	-7.20	-5.47	-26.50	-8.86	-11.03	-8.83	-15.42
Energia utile totale	45.92	37.63	45.92	43.96	69.67	61.28	69.68	64.34	49.52	43.63	49.51	46.39

7.3 Ottimizzazione delle TVI

Per ottimizzare l'applicazione delle TVI sugli edifici selezionati, sono stati confrontati i risultati relativi alla simulazione degli scenari energetici con quelli microclimatici. In particolare, sono state confrontate le variazioni percentuali del fabbisogno di energia utile di riscaldamento e raffrescamento normalizzate, calcolate per i mesi di accensione effettiva secondo le aree climatiche italiane, rispetto agli scenari baseline (Tabella 3), con il potenziale di adattamento all'isola di calore urbana delle TVI calcolato con le equazioni 1-3.

Tabella 3 – Variazioni percentuali del fabbisogno di energia utile di riscaldamento e raffrescamento rispetto agli scenari baseline con applicazione dei limiti di accensione per le diverse aree climatiche

Mese	Bari EGR	Bari GF	Bari LW	Firenze EGR	Firenze GF	Firenze LW	Roma EGR	Roma GF	Roma LW
Gennaio	-20.81%	0.02%	-18.25%	-14.24%	0.07%	-31.88%	-16.48%	0.03%	-18.94%
Febbraio	-20.65%	0.03%	-18.68%	-14.68%	0.09%	-34.13%	-18.57%	0.05%	-21.09%
Marzo	-24.81%	0.07%	-24.83%	-18.53%	0.16%	-51.04%	-24.05%	0.11%	-27.46%
Aprile	0.00%	0.00%	0.00%	-22.41%	0.26%	-60.85%	-32.58%	0.20%	-37.33%
Maggio	0.00%	0.00%	0.00%	124.87%	-5.93%	9840.06%	329.69%	-4.47%	2354.26%
Giugno	109.94%	-1.30%	707.39%	27.84%	-1.16%	406.18%	59.32%	-0.95%	203.25%
Luglio	52.88%	-0.59%	247.20%	29.96%	-1.06%	260.34%	17.31%	-0.32%	45.90%
Agosto	71.45%	-0.83%	323.83%	29.93%	-1.07%	325.74%	17.58%	-0.32%	56.44%
Settembre	52.66%	-0.64%	354.68%	135.75%	-3.87%	10876.44%	43.32%	-0.52%	116.49%
Ottobre	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	176.27%	-1.35%	580.51%
Novembre	-24.46%	0.04%	-22.25%	-17.47%	0.12%	-42.02%	-22.91%	0.06%	-31.46%
Dicembre	-21.80%	0.02%	-19.62%	-13.44%	0.05%	-32.22%	-17.07%	0.03%	-20.23%
Totale riscaldamento	-22.11%	0.03%	-20.61%	-15.68%	0.10%	-41.01%	-19.83%	0.06%	-23.83%
Totale raffrescamento	63.63%	-0.73%	324.56%	30.20%	-1.11%	379.01%	24.44%	-0.40%	73.98%
Energia utile totale	-18.05%	0.00%	-4.27%	-12.04%	0.00%	-7.66%	-11.90%	-0.02%	-6.33%

Ne è risultato che l'applicazione di scenari basati sull'EGR su edifici alti come quelli di Roma, Bari e Firenze determina una mitigazione dell'isola di calore urbana ad altezza pedonale quasi trascurabile (Figura 3). Tuttavia, la Tabella 3 mostra che l'installazione di un EGR può ridurre i consumi di energia utile per il riscaldamento del 22%, e aumentare quelli per il raffrescamento del 64%, con un risparmio dell'energia utile totale pari al 18% (caso studio di Bari). Questo risultato è probabilmente dovuto al fatto che in estate il calore incontra nella resistenza termica dell'EGR un ulteriore impedimento al suo smaltimento. Una possibile ottimizzazione potrebbe risiedere nell'aumento della fornitura di acqua al substrato, così che il calore sensibile del terreno venga trasformato in calore latente. I casi di studio di Roma e Firenze risultano essere simili a quello di Bari, con l'installazione dell'EGR che aumenta l'energia utile di raffrescamento e diminuisce quella di riscaldamento, con un risparmio annuo di circa il 12%.

Nel caso dell'installazione di GF, il loro potenziale di adattamento all'isola di calore urbana aumenta all'aumentare del LAI e del COP (Figura 3). In corrispondenza di LAI 5 e COP 100%, il potenziale medio spaziale di adattamento è massimo ed è pari a ~0,2 °C. Dalla Tabella 2 si nota un aumento dell'energia utile di riscaldamento pari a circa lo 0,1%, dovuto all'ombreggiamento fornito dalla vegetazione, che in estate, determina una diminuzione dell'energia utile per il raffrescamento pari allo 0,7%, nel caso di Bari. Similmente, per Roma e Firenze, si ottiene una diminuzione rispettivamente dello 0,4% e dell'1,1% dell'energia di raffrescamento e un aumento dello 0,07% e dello 0,13% per quella di riscaldamento e, in tutti i casi, una diminuzione del fabbisogno di energia utile annua. Per ottimizzare il comportamento energetico delle GF, si potrebbero utilizzare specie verdi caducifoglie che non forniscono ombreggiamento in inverno, evitando così un aumento dell'energia utile di riscaldamento.

Infine, l'applicazione dei LW mostra il massimo adattamento all'isola di calore urbana estiva quando la vegetazione ha un COP100% e LAI 5, come nei casi analizzati, pari a ~0,2 °C (Figura 3). Dal punto di vista energetico, risulta che l'installazione di LW determina un aumento dell'energia utile di raffrescamento e una diminuzione di quella di riscaldamento in tutti e tre i casi di studio (Tabella 2), con una diminuzione del fabbisogno annuo. L'ottimizzazione di questa TVI dovrebbe mirare a ridurre l'energia utile di raffrescamento. A tal fine, si potrebbe aumentare, in estate, la quantità di acqua nel substrato per trasformare il calore sensibile in

calore latente, abbassando la temperatura superficiale e favorendo il flusso termico dall'interno verso l'esterno dell'edificio.

Bibliografia

- [1] F. Cumo, F. Giustini, e E. Pennacchia, «Stato dell'arte di soluzioni tecnologiche di involucro edilizio esistenti come base per interventi di Deep Renovation del patrimonio immobiliare nel settore abitativo», ENEA, Report Ricerca di Sistema Elettrico RdS/PTR2019/, dic. 2019.
- [2] J. Iaria e T. Susca, «Analytic Hierarchy Processes (AHP) evaluation of green roof- and green wall- based UHI mitigation strategies via ENVI-met simulations», *Urban Climate*, vol. 46, 2022, doi: 10.1016/j.uclim.2022.101293.
- [3] Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare, «Geoportale nazionale». [Online]. Disponibile su: http://www.pcn.minambiente.it/geoportal/catalog/search/resource/details.page?uuid=m_amte%3A299FN3%3A24d2c4ab-0036-4be0-c803-f1eded63c3fb
- [4] T. Susca, J. Iaria, e F. Zanghirella, «Development of predictive indices for evaluating the UHI adaptation potential of green roof- and wall-based scenarios in the Mediterranean climate», *Sci Rep*, vol. 14, fasc. 1, p. 21675, set. 2024, doi: 10.1038/s41598-024-67567-9.
- [5] Y. Zhao *et al.*, «Beating urban heat: Multimeasure-centric solution sets and a complementary framework for decision-making», *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 186, p. 113668, ott. 2023, doi: 10.1016/j.rser.2023.113668.

8 Contributo delle eventuali consulenze alle attività sopra descritte

Nessuna consulenza utilizzata all'interno della LA, come previsto da capitolato.

9 Pubblicazioni scientifiche

Di seguito si riporta l'indicazione delle pubblicazioni scientifiche relative al periodo di rendicontazione del presente rapporto tecnico:

- Susca, T., Iaria, J., Zanghirella, F. (2024) Development of predictive indices for evaluating the UHI adaptation potential of green roof- and wall-based scenarios in the Mediterranean climate, *Nature, Scientific Reports (Impact Factor 3.8)*
- Susca, T. (2024) L'isola di calore urbana, conseguenze e soluzioni. Focus su Roma. *Bioarchitettura®Abitare la Terra* n. 148
- Susca, T. (2024). Nature-Based Solutions Applied to the Built Environment to Alleviate Climate Change: A Geographical Multi-scale Perspective. In: Lackner, M., Sajjadi, B., Chen, WY. (eds) *Handbook of Climate Change Mitigation and Adaptation*. Springer, New York, NY. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-6431-0_123-3
- De Rossi, P., Hugony, F., Latini, A., Mastrilli, A., Pace, S., Pistochini, P., Susca, T., Zanghirella, F., (2024) *TETTI E PARETI VERDI PER EDIFICI*. Linee Guida per la Pubblica Amministrazione e gli Enti Territoriali., ENEA pubblicazioni, ISBN: 978-88-8286-461-3 (paper edition) ISBN: 978-88-8286-462-0 (web edition)
- Susca, T., Iaria, J., Zanghirella, F., Green Roof- and Wall-UHI Mitigation Potential in a Mediterranean Climate: Analysis of the Effect of Building Height, Plant Coverage Percentage, and LAI. Abstract e presentazione alla: 19th SDEWES conference. 8-12 Settembre 2024, Rome, Italy
- Zanghirella, F., Iaria, J., Susca, T., Development of Synthetic Indices for Predicting Urban Heat Island Adaptation Plan Potential in Mediterranean Cities. Abstract e presentazione alla: 19th SDEWES conference. 8-12 Settembre 2024, Rome, Italy
- Zhao, Y., Sen, S., Susca, T., Iaria, J., Kubilay, A., Gunawardena, K., Zhou, X., Takane, Y., Park, Y., Wang, X., Rubin, A., Fan, Y., Yuan, C., Bardhan, R., Derome, D., Ürge-Vorsatz, D., Carmeliet, J., (2023) Beating urban heat: Multimeasure-centric solution sets and a complementary framework for decision-making, *Renewable & Sustainable Energy Reviews (Impact Factor 15.9)*
- Susca, T., Iaria, J. Parametric analysis of green roof- and wall-mitigation-scenarios via ENVI-met and AHP: the effect of building height, coverage percentage, and LAI. Abstract e presentazione all'[ICUC11](#). 1 Settembre, 2023, Sydney, Australia
- Zanghirella, F., Susca, T., Del Fatto, V. The effect of building integrated nature-based solutions on urban heat island. The case studies of Italian cities. Abstract e presentazione all'[ICUC11](#). 1 Settembre, 2023, Sydney, Australia

10 Eventi di disseminazione

Di seguito un elenco delle attività di disseminazione svolte, in termini di presentazioni effettuate, con dettaglio relativo al contesto e ai principali contenuti presentati (si fa presente che l'elenco delle conferenze scientifiche a cui ha partecipato il gruppo di lavoro si trova nella sezione precedente, in cui i relativi atti di convegno sono inseriti nelle pubblicazioni scientifiche):

- ENEA, in collaborazione con il [Comune di Bolzano](#), ha organizzato una conferenza dedicata alle tecnologie verdi di involucro (TVI), come tetti e pareti verdi intitolata "Tetti verdi. Innovazione Naturale per la Sostenibilità Urbana (Figura 18). Le Soluzioni del Dipartimento Unità Efficienza Energetica". L'evento, tenutosi a Bolzano l'11 dicembre 2024, si è focalizzato sul loro ruolo nella transizione energetica delle città, in linea con le disposizioni della nuova direttiva europea "Case Green".



Figura 18 – Locandina dell'evento organizzato da ENEA e dal Comune di Bolzano

Durante l'incontro sono stati presentati in anteprima i risultati delle attività di ricerca sul tema "Edifici ad alta efficienza per la transizione energetica" (tema 1.5) nell'ambito dell'Accordo di Programma M.A.S.E. - ENEA per la Ricerca di Sistema Elettrico (PTR 2022-2024). Nello specifico i risultati della presente LA sono stati mostrati nella presentazione:

Susca, T., Zanghirella, F., "Simulazione di scenari urbani con TVI, potenzialità e prospettive"

- Inoltre, ENEA ha organizzato un webinar dal titolo “Tetti e pareti verdi per gli edifici. Linee guida per la pubblica amministrazione e gli Enti territoriali” per la presentazione di specifiche Linee guida dedicate ai Tetti e alle Pareti Verdi. Tale webinar si è tenuto il 4 luglio 2024 (Figura 19). Le linee guida sviluppate e presentate da ENEA sono uno strumento che fornisce un quadro conoscitivo completo e offre una panoramica legislativa a livello europeo e nazionale, oltre che una sintesi dei bandi nazionali per finanziare le infrastrutture verdi. Le linee guida e il webinar hanno il fine di supportare la Pubblica Amministrazione nell'implementazione delle infrastrutture verdi. Nel webinar sono state illustrate le evidenze scientifiche sui vantaggi energetici, ambientali, sociali ed economici dell'installazione di Tetti e Pareti Verdi, oltre alle principali tipologie di tali sistemi, con dettagli sugli aspetti tecnici di pianificazione, progettazione e manutenzione necessari per garantirne l'efficacia.

#savethedate

Italia in classe A
Programma Nazionale di Informazione e Formazione sull'Efficienza Energetica

ENEA
AGENZIA NAZIONALE PER LE MANE TECNOLOGIE, L'ENERGIA E LO SVILUPPO ECONOMICO SOSTENIBILE

AGENZIA NAZIONALE EFFICIENZA ENERGETICA
ENEA

Webinar di Presentazione della Guida

**TETTI E PARETI VERDI
PER GLI EDIFICI**

Linee guida per la Pubblica Amministrazione
e gli Enti Territoriali

4 Luglio 2024
dalle ore 10:00 alle ore 12:20

www.efficienzaenergetica.enea.it

f X YouTube Instagram in

Figura 19 - Locandina del webinar di presentazione della guida a “Tetti e pareti verdi per gli edifici” organizzato da ENEA

Durante l’incontro i risultati della presente LA sono stati mostrati nella seguente presentazione:

Zanghirella, F., Studio ENEA sull'effetto dell'applicazione di Tetti e Pareti Verdi per la mitigazione dell'isola di calore urbana – I casi studio di Roma e Torino

L’evento è stato anche registrato ed è presente su Youtube al seguente indirizzo:
<https://www.youtube.com/live/lx40onHp0-o>

- Infine, per rafforzare i rapporti di collaborazione internazionale, nell’ambito della presente LA è stata organizzata dalla dott.ssa ing. Tiziana Susca e dal dott. ing. Fabio Zanghirella una call for contribution per un volume speciale intitolato “Urban Heat Islands, Global Warming and Effects” della rivista scientifica Atmosphere, disponibile al seguente link (Figura 20): https://www.mdpi.com/journal/atmosphere/special_issues/VQ447JH245

Special Issue

Urban Heat Islands, Global Warming and Effects

Guest Editors

Dr. Tiziana Susca
Dr. Fabio Zanghirella

Deadline

30 April 2025



atmosphere

IMPACT
FACTOR
2.5

CITESCORE
4.6

Figura 20 - Locandina dello special issue organizzato per la rivista Atmosphere (MDPI)