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

Ministero della Transizione Ecologica

Ricerca di Sistema elettrico

Quantificazione degli effetti sulla mitigazione dell'isola di calore urbana, sul consumo energetico degli edifici e sviluppo di fattori di caratterizzazione LCA relativi a scenari di applicazione di strategie verdi d'involucro

T. Susca, F. Zanghirella, L. Colasuonno, V. Del Fatto

Report RdS/PTR2021/122

QUANTIFICAZIONE DEGLI EFFETTI SULLA MITIGAZIONE DELL'ISOLA DI CALORE URBANA, SUL CONSUMO ENERGETICO DEGLI EDIFICI E SVILUPPO DI FATTORI DI CARATTERIZZAZIONE LCA RELATIVI A SCENARI DI APPLICAZIONE DI STRATEGIE VERDI D'INVOLUCRO

T. Susca, F. Zanghirella, L. Colasuonno, V. Del Fatto (ENEA)

Dicembre 2021

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico (oggi Ministero della Transizione Ecologica) - ENEA
Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021 - III 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: *LA2.8 - Applicazione e valutazione delle strategie di mitigazione dell'isola di calore urbana e sviluppo e applicazione della metodologia LCA*
Responsabile del Progetto: Giovanni Puglisi
Responsabile del Work package: Giovanni Puglisi

Si ringraziano il dr. Jacopo Iaria e Chiara Chessa per il loro contributo al report

Indice

SOMMARIO 6

1 ISOLA DI CALORE URBANA A ROMA 8

1.1 STAZIONI METEOROLOGICHE 8
1.2 DATI METEOROLOGICI E COEFFICIENTI DI DETERMINAZIONE 8
1.3 ISOLA DI CALORE URBANA 20

2 ISOLA DI CALORE URBANA A TORINO 25

2.1 STAZIONI METEOROLOGICHE 25
2.2 DATI E COEFFICIENTI DI DETERMINAZIONE 25
2.3 ISOLA DI CALORE URBANA 33

3 ISOLA DI CALORE URBANA A MILANO 38

3.1 STAZIONI METEOROLOGICHE 38
3.2 DATI E COEFFICIENTI DI DETERMINAZIONE 38
3.3 ISOLA DI CALORE URBANA 49

4 CARATTERISTICHE TERMICHE DELLE TECNOLOGIE VERDI D'INVOLUCRO 53

5 MODELLAZIONE DEGLI SCENARI DI MITIGAZIONE IN ENVI-MET 55

5.1 ROMA 60
5.2 TORINO 66
5.3 MILANO 75

6 DEFINIZIONE DEI PARAMETRI SENSIBILI 83

7 OUTPUT DELLA MODELLAZIONE ENVI-MET 84

7.1 ROMA 84
7.1.1 Scenari baseline 84
7.1.2 Confronto tra le temperature dell'aria e CO_2 all'altezza dei pedoni relativi a scenari riferiti alla giornata tipica invernale (19/02/2015) 88
7.1.3 Confronto tra le temperature dell'aria e CO_2 all'altezza dei pedoni relativi a scenari riferiti alla giornata tipica estiva (01/07/2015) 96
7.1.4 Confronto tra le temperature dell'aria e CO_2 all'altezza dei pedoni relativi a scenari riferiti alla giornata tipica con ondata di calore (22/07/2015) 103
7.2 TORINO 110
7.2.1 Scenari baseline 110
7.2.2 Confronto tra temperature dell'aria all'altezza dei pedoni relative a scenari riferiti alla giornata tipica invernale (19/01/2016) 114
7.2.3 Confronto tra le temperature dell'aria all'altezza dei pedoni relativi a scenari riferiti alla giornata tipica estiva (27/07/2014) 121
7.2.4 Confronto tra le temperature dell'aria all'altezza dei pedoni relativi a scenari riferiti alla giornata tipica con ondata di calore (07/07/2015) 128
7.3 MILANO 135
7.3.1 Scenari baseline 135
7.3.2 Confronto tra temperature dell'aria all'altezza dei pedoni relativi a scenari riferiti alla giornata tipica invernale (14/12/2018) 139
7.3.3 Confronto tra le temperature dell'aria all'altezza dei pedoni relativi a scenari riferiti alla giornata tipica estiva (19/06/2015) 145
7.3.4 Confronto tra le temperature dell'aria all'altezza dei pedoni relativi a scenari riferiti alla giornata tipica con ondata di calore (07/07/2015) 153
7.4 RISULTATI GENERALI 160

8 EFFETTO DEGLI SCENARI DI MITIGAZIONE SULL'USO DI ENERGIA DEGLI EDIFICI 162

8.1 SCENARI BASELINE 162

8.1.1 Gli edifici simulati *162*
8.1.2 Dati meteorologici *163*
8.2 SCENARI DI MITIGAZIONE 166
8.3 RISULTATI 172

9 SVILUPPO DI UNA METODOLOGIA LCA PER LA CARATTERIZZAZIONE DELL'APPLICAZIONE DI STRATEGIE DI MITIGAZIONE DELLA UHI 178

9.1 IL METODO RECIPE2016 178
9.2 SVILUPPO DI FATTORI DI CARATTERIZZAZIONE PER LA VALUTAZIONE DELL'APPLICAZIONE DI SCENARI DI MITIGAZIONE DELLA UHI BASATI SULL'APPLICAZIONE DI SINGOLE TECNOLOGIE VERDI D'INVOLUCRO 179
9.2.1 Fattori di caratterizzazione midpoint *180*
9.2.1.1 Approccio A 181
9.2.1.2 Approccio B: sviluppo di un fattore di caratterizzazione *midpoint* relativo all'applicazione singola di strategie di mitigazione basate sull'applicazione di facciate verdi 181
9.2.2 Applicazione della relazione matematica sintetica (Approccio B) ad un caso di studio *187*
9.2.3 Sviluppo di un fattore di caratterizzazione endpoint relativo alla variazione di temperatura locale *187*

10 *LIFE CYCLE ASSESSMENT* DELLE TECNOLOGIE VERDI DI INVOLUCRO: APPLICAZIONE AD UN CASO DI STUDIO 191

10.1 CASI DI STUDIO 191
10.2 LCI E IMPATTI DEL TETTO VERDE ESTENSIVO 191
10.3 LCI E IMPATTI DELLA FACCIATA VERDE INDIRETTA 196
10.4 VARIAZIONE DI ENERGIA NELLA FASE D'USO SCENARIO 198
10.5 VALUTAZIONE DEGLI IMPATTI EVITATI SU TEMPERATURA LOCALE E SALUTE UMANA PER LE TRE GIORNATE TIPO 205
10.5.1 Giornata tipica estiva *206*
10.5.2 Giornata tipica con ondata di calore *207*
10.5.3 Giornata tipica invernale *209*
10.6 VALUTAZIONE DELL'IMPATTO DELLA MITIGAZIONE DELLE TEMPERATURE RISPETTO AGLI IMPATTI DEGLI SCENARI DI MITIGAZIONE 211

11 CONCLUSIONI 217

12 APPENDICE 221

13 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI 225

14 ABBREVIAZIONI ED ACRONIMI 229

Sommario

Durante la terza annualità del PTR 2019-2021 di Ricerca di Sistema si è provveduto a simulare l'interazione tra clima e edificato utilizzando i modelli delle città di Roma, Torino e Milano per una giornata tipica estiva, con ondata di calore e invernale. I dati meteorologici rurali relativi alle tre giornate significative sono stati utilizzati per forzare il modello delle città realizzato con ENVI-met e simulare gli scenari base e gli scenari di mitigazione. Le temperature registrate in ambiente rurale sono state confrontate con quelle urbane per quantificare la magnitudo dell'isola di calore (UHI).

Per Roma lo scenario che prevede l'installazione congiunta di tetti e pareti verdi è quello che mitiga le temperature della giornata tipica estiva e con ondata di calore in maggior modo. Per Torino, l'installazione di living wall o di green façade in un canyon parallelo alla direzione principale del vento fornisce la maggior mitigazione in tutte le giornate analizzate. Per Milano gli effetti sulle temperature sono amplificati installando congiuntamente living wall in un canyon urbano e un tetto verde estensivo. Dall'analisi degli *output* delle simulazioni è risultato che per tutte le città, tutti gli scenari risultano ininfluenti sulla concentrazione di CO_2 nell'aria.

Per ciascuna città, le variazioni di temperatura relative all'applicazione degli scenari di mitigazione sono state utilizzate per calcolare la variazione di consumo energetico degli archetipi di edifici. È risultato che l'applicazione di *living wall* e *green roof* ha effetti benefici sulle performance termiche sia in inverno sia in estate. Gli scenari che prevedono l'installazione esclusiva o congiunta di facciate verdi restituiscono risultati meno positivi in quanto le *green façade* con specie vegetali sempreverdi riducono gli apporti solari gratuiti invernali.

Poiché la concentrazione di CO_2 è risultata invariata per effetto dell'applicazione degli scenari di mitigazione, si è focalizzata l'attenzione sullo sviluppo di un modello di caratterizzazione per includere l'effetto dell'installazione di facciate verdi sulla temperatura massima dell'aria in ambiente urbano. Tale modello di caratterizzazione *midpoint* è una relazione matematica sintetica in grado di restituire al variare dell'altezza media degli edifici, della percentuale di copertura e dell'indice di area fogliare la mitigazione potenziale dell'UHI. Inoltre, è stata individuata in bibliografia una relazione in grado di restituire l'impatto *endpoint* della variazione della mortalità relativo alla variazione della temperatura urbana. Entrambi i fattori di caratterizzazione sono stati applicati ai casi di studio (i.e., un caso di studio per il fattore *midpoint* e due casi di studio—scenari RM1 e RM2—per il fattore *endpoint*). Da quest'ultima applicazione è risultato che gli impatti evitati in inverno sono di un ordine di grandezza maggiore rispetto agli impatti relativi all'applicazione degli scenari di mitigazione, mentre quelli relativi alle morti evitate sono di almeno tre ordini di grandezza superiori. Infine, gli impatti evitati relativi agli impatti evitati per raffrescamento degli edifici sono di almeno un ordine di grandezza superiore.

Tra i risultati raggiunti durante questa annualità vi è la pubblicazione di un articolo scientifico su rivista internazionale (i.e., [1]); altri due articoli verranno inviati a breve ad altre due riviste internazionali.

Introduzione

L'isola di calore urbana (Urban Heat Island – UHI), ovvero l'aumento della temperatura urbana rispetto a quella rurale, è un fenomeno molto diffuso soprattutto nelle medie e grandi città [2] e spesso può raggiungere anche gli 8-12 °C come nel caso della città di New York [3]. Tale fenomeno ha ripercussioni sia sul consumo energetico degli edifici per il raffrescamento estivo sia sulla salute umana. Infatti, recenti studi hanno mostrato che la UHI causa aumenti dell'energia di raffrescamento fino al 19% [4] e che la stessa provoca a Londra il 40% delle morti in condizioni di calore non estremo [5].

Pertanto, è fondamentale che per le città afflitte dall'isola di calore si possano prevedere piani e scenari di mitigazione della stessa i cui impatti siano verificabili. Tra le strategie di mitigazione più diffuse troviamo le soluzioni basate sulla natura (i.e., Nature-based Solutions). Tuttavia, soprattutto in città densamente edificate, è difficile trovare spazi residuali che consentano la piantumazione di alberi o la realizzazione di parchi urbani; invece, gli edifici possono offrire vaste superfici per l'applicazione di tetti e pareti verdi (i.e., tecnologie verdi d'involucro).

Numerosi studi sono stati condotti negli ultimi anni circa gli effetti dell'installazione di tecnologie verdi d'involucro. Questi hanno mostrato che i tetti verdi possono ridurre l'energia per il riscaldamento e il raffrescamento degli edifici fino al 60% e al 75%, rispettivamente a seconda dell'area climatica [6] e che le pareti verdi possono ridurre i consumi energetici degli edifici fino al 16.5% e al 51% rispettivamente in inverno e in estate [7]. Inoltre, si è visto che l'applicazione di tetti verdi ha effetti pressoché nulli sulla mitigazione dell'UHI ad altezza pedonale [6], mentre una diffusa installazione di pareti verdi può ridurre la magnitudo della UHI anche fino a 8 °C in città densamente urbanizzate, risultando risolutiva del fenomeno di riscaldamento locale [7].

In questo contesto, durante il terzo anno dell'Accordo di Programma ci si è focalizzati sulla valutazione degli impatti che l'applicazione di scenari di mitigazione basati sull'installazione di tecnologie verdi d'involucro ha sulla salute umana, sui consumi energetici degli edifici e sull'ambiente.

Generalmente, la metodologia LCA è uno strumento che viene ampiamente utilizzato per la valutazione degli impatti, in un'ottica di ciclo di vita, di prodotti e servizi. Tuttavia, quando viene applicata alla scala urbana o alla scala di frazione di città (i.e., a isolati o quartieri), tale metodologia fallisce, per come attualmente implementata, nel catturare le interazioni tra ambiente costruito e clima locale, e, in particolare, l'isola di calore urbana e gli impatti che questa ha sulla qualità degli ecosistemi, salute umana e risorse.

In questo contesto, il presente studio è stato finalizzato ad implementare la metodologia LCA esistente in modo da includere gli effetti dell'applicazione di strategie di mitigazione sulla temperatura locale. Il contesto scientifico in questione è ampiamente inesplorato e pertanto ha permesso che lo studio fosse orientato verso l'investigazione degli effetti di una particolare strategia, tra le diverse, di mitigazione sulla temperatura massima di un'area urbana, ovvero sull'applicazione di facciate verdi. Inoltre, si è applicata una metodologia per il calcolo degli effetti della variazione dell'isola di calore sulla salute umana.

L'esplorazione delle variazioni delle temperature urbane e degli effetti che queste hanno sui consumi energetici degli edifici e la loro implementazioni nelle logiche di LCA sono state applicate a un caso di studio. Gli *output* del lavoro di ricerca fatto durante questa annualità potranno essere utilizzati dai decisori urbani al fine di valutare correttamente le strategie di mitigazione dell'isola di calore urbana e di rendere efficace la loro applicazione. Inoltre, i risultati dello studio condotto durante la terza annualità dell'Accordo di Programma costituiscono le basi su cui futuri studi finalizzati all'implementazione della metodologia LCA applicata agli ambienti urbani potranno basarsi per ulteriori avanzamenti metodologici.

1 Isola di calore urbana a Roma

1.1 Stazioni meteorologiche

Al fine di forzare il modello ENVI-met, per le condizioni meteorologiche al contorno del dominio di calcolo, sono stati scaricati i dati relativi alla stazione meteorologica di Castel di Guido [8].

La stazione meteorologica di Castel di Guido è sita in un'area rurale ad Ovest di Roma capitale fuori dal raccordo anulare e a circa 20 km dalla stazione meteorologica di via Lanciani 38. Al contrario, quest'ultima è sita in un'area densamente urbanizzata di Roma (Figura 1).

Figura 1. Individuazione delle stazioni meteorologiche di Castel di Guido e di Via Lanciani 38, Roma

I dati meteorologici rilevati dalle due stazioni possono, in ragione della localizzazione di quest'ultime, essere utilizzati per identificare la magnitudo dell'isola di calore di Roma. In particolare, i dati delle due stazioni meteorologiche sono stati utilizzati per identificare l'UHI di una giornata tipica invernale, ovvero il 19 febbraio 2015, tipica di una giornata estiva, ovvero il 1° luglio 2015, e in presenza di un'ondata di calore, con riferimento alla giornata del 22 luglio 2015.

1.2 Dati meteorologici e coefficienti di determinazione

I dati meteorologici utilizzati per forzare le condizioni al contorno del dominio e per il calcolo delle isole di calore urbane di Roma sono riportati in
Tabella 1-Tabella 6.

Tabella 1. Dati meteorologici relativi al 19.02.2015 rilevati dalla stazione di Castel di Guido

Date [DD.MM.YYYY]	Time [hh:mm:ss]	Abs. Temperature [K]	Rel. Humidity [%]	WindSpeed [m/s]	WindDir [°]
19.02.2015	00:00:00	278.74	55.60	1.03	10.10
19.02.2015	00:30:00	278.46	57.15	1.28	10.77
19.02.2015	01:00:00	278.43	57.99	1.63	6.07

19.02.2015	01:30:00	278.26	58.34	1.90	8.46
19.02.2015	02:00:00	277.94	58.88	1.43	9.62
19.02.2015	02:30:00	277.47	60.49	1.52	19.71
19.02.2015	03:00:00	277.28	60.19	1.56	18.68
19.02.2015	03:30:00	276.96	60.81	1.62	19.52
19.02.2015	04:00:00	277.21	59.23	1.72	18.17
19.02.2015	04:30:00	277.54	58.02	2.12	28.76
19.02.2015	05:00:00	277.45	57.45	1.78	25.15
19.02.2015	05:30:00	277.29	57.20	1.83	22.53
19.02.2015	06:00:00	276.96	58.00	1.63	22.00
19.02.2015	06:30:00	276.54	59.01	1.93	24.85
19.02.2015	07:00:00	276.32	59.65	2.06	26.44
19.02.2015	07:30:00	276.76	58.65	2.57	31.75
19.02.2015	08:00:00	277.06	58.10	2.69	34.96
19.02.2015	08:30:00	277.67	55.43	3.42	38.47
19.02.2015	09:00:00	278.39	53.63	3.68	33.04
19.02.2015	09:30:00	279.29	50.78	3.43	31.65
19.02.2015	10:00:00	280.41	46.04	3.83	34.98
19.02.2015	10:30:00	281.26	44.45	3.03	38.23
19.02.2015	11:00:00	282.25	43.39	2.34	39.66
19.02.2015	11:30:00	283.82	40.85	2.34	52.75
19.02.2015	12:00:00	284.64	40.33	1.31	91.83
19.02.2015	12:30:00	285.09	41.43	1.67	218.92
19.02.2015	13:00:00	285.25	43.29	2.04	222.08
19.02.2015	13:30:00	285.55	43.72	2.32	257.22
19.02.2015	14:00:00	285.44	44.28	2.79	254.10
19.02.2015	14:30:00	285.46	46.82	3.34	235.49
19.02.2015	15:00:00	285.45	48.80	2.99	246.05
19.02.2015	15:30:00	285.22	50.32	3.45	254.42
19.02.2015	16:00:00	285.07	51.67	3.24	246.85
19.02.2015	16:30:00	285.02	53.70	2.63	256.34
19.02.2015	17:00:00	284.62	55.94	2.66	253.77
19.02.2015	17:30:00	284.25	58.64	2.36	250.27
19.02.2015	18:00:00	283.59	62.03	1.92	264.04
19.02.2015	18:30:00	283.23	62.94	1.50	274.81
19.02.2015	19:00:00	282.99	63.77	1.17	264.57
19.02.2015	19:30:00	282.88	63.79	1.35	283.64
19.02.2015	20:00:00	282.64	65.61	1.66	312.59
19.02.2015	20:30:00	282.23	67.80	2.18	323.08
19.02.2015	21:00:00	281.74	69.63	2.19	328.55
19.02.2015	21:30:00	280.91	72.72	2.52	349.69
19.02.2015	22:00:00	280.59	74.23	2.63	353.75
19.02.2015	22:30:00	280.42	75.17	2.10	356.82
19.02.2015	23:00:00	279.87	77.41	2.48	38.01
19.02.2015	23:30:00	279.80	78.10	2.36	32.19
20.02.2015	00:00:00	279.78	77.75	2.15	18.11

Tabella 2. Dati meteorologici relativi allo 01.07.2015 rilevati dalla stazione di Castel di Guido

Date [DD.MM.YYYY]	Time [hh:mm:ss]	Abs. Temperature [K]	Rel. Humidity [%]	WindSpeed [m/s]	WindDir [°]
01.07.2015	00:00:00	295.36	97.62	0.93	200.99
01.07.2015	00:30:00	295.63	99.16	0.90	214.02
01.07.2015	01:00:00	294.92	93.48	0.70	77.23
01.07.2015	01:30:00	294.01	92.21	1.06	76.09
01.07.2015	02:00:00	294.12	90.95	0.98	91.08
01.07.2015	02:30:00	294.02	92.85	1.05	41.74
01.07.2015	03:00:00	293.64	94.74	1.00	42.77
01.07.2015	03:30:00	293.57	96.63	1.43	28.28
01.07.2015	04:00:00	293.55	98.53	1.70	28.14
01.07.2015	04:30:00	292.84	98.31	2.11	34.10
01.07.2015	05:00:00	293.00	92.89	2.06	29.53
01.07.2015	05:30:00	292.89	90.95	2.24	27.83
01.07.2015	06:00:00	293.56	86.94	2.37	38.84
01.07.2015	06:30:00	294.11	84.47	2.29	46.28
01.07.2015	07:00:00	295.38	76.50	2.31	51.14
01.07.2015	07:30:00	296.55	67.31	3.04	66.18
01.07.2015	08:00:00	297.88	63.15	2.42	67.38
01.07.2015	08:30:00	298.88	59.24	2.48	72.32
01.07.2015	09:00:00	299.82	53.59	2.35	65.44
01.07.2015	09:30:00	301.05	46.61	1.78	101.24
01.07.2015	10:00:00	301.78	41.78	1.50	88.60
01.07.2015	10:30:00	302.63	37.89	0.68	94.37
01.07.2015	11:00:00	303.12	40.10	1.55	196.44
01.07.2015	11:30:00	302.20	51.74	3.62	242.20
01.07.2015	12:00:00	302.30	47.21	3.84	227.32
01.07.2015	12:30:00	302.19	46.06	4.04	230.01
01.07.2015	13:00:00	301.96	45.73	4.57	218.82
01.07.2015	13:30:00	301.74	50.10	4.06	228.25
01.07.2015	14:00:00	301.19	52.34	4.04	235.62
01.07.2015	14:30:00	301.17	53.55	3.69	231.04
01.07.2015	15:00:00	301.31	53.83	3.70	236.31
01.07.2015	15:30:00	300.30	63.11	4.82	261.35
01.07.2015	16:00:00	300.19	64.96	4.33	263.13
01.07.2015	16:30:00	299.95	68.09	4.20	261.73
01.07.2015	17:00:00	299.77	69.19	4.39	262.54
01.07.2015	17:30:00	299.38	69.17	4.10	263.00
01.07.2015	18:00:00	299.42	69.03	3.24	259.37
01.07.2015	18:30:00	299.03	68.28	3.07	263.57
01.07.2015	19:00:00	298.62	71.28	2.39	262.15
01.07.2015	19:30:00	298.19	74.27	2.40	248.52
01.07.2015	20:00:00	297.79	79.25	1.93	246.32
01.07.2015	20:30:00	297.18	84.43	1.44	232.91
01.07.2015	21:00:00	296.87	86.70	0.83	219.40
01.07.2015	21:30:00	296.26	88.96	0.85	141.65
01.07.2015	22:00:00	295.97	93.08	0.95	142.36

01.07.2015	22:30:00	296.30	93.09	0.94	205.22
01.07.2015	23:00:00	296.23	93.79	1.11	215.33
01.07.2015	23:30:00	295.85	96.56	0.44	110.72
02.07.2015	00:00:00	295.85	97.58	0.35	69.40

Tabella 3. Dati meteorologici relativi al 22.07.2015 rilevati dalla stazione di Castel di Guido

Date [DD.MM.YYYY]	Time [hh:mm:ss]	Abs. Temperature [K]	Rel. Humidity [%]	WindSpeed [m/s]	WindDir [°]
22.07.2015	00:00:00	297.95	97.77	0.81	8.94
22.07.2015	00:30:00	297.28	95.89	2.00	341.92
22.07.2015	01:00:00	298.17	78.34	2.02	345.58
22.07.2015	01:30:00	298.45	66.46	2.29	345.59
22.07.2015	02:00:00	299.32	55.65	1.89	1.22
22.07.2015	02:30:00	298.80	60.30	1.84	18.28
22.07.2015	03:00:00	297.75	66.85	2.03	22.62
22.07.2015	03:30:00	297.95	62.81	2.09	21.80
22.07.2015	04:00:00	297.41	64.30	1.50	34.13
22.07.2015	04:30:00	297.69	67.06	1.57	64.08
22.07.2015	05:00:00	298.07	66.35	2.29	42.69
22.07.2015	05:30:00	297.18	65.01	3.17	33.59
22.07.2015	06:00:00	297.68	64.38	2.84	41.80
22.07.2015	06:30:00	297.65	65.62	2.16	41.56
22.07.2015	07:00:00	298.54	62.77	2.00	44.10
22.07.2015	07:30:00	300.10	56.78	1.86	43.04
22.07.2015	08:00:00	301.71	51.50	1.81	42.29
22.07.2015	08:30:00	303.40	45.02	1.73	51.08
22.07.2015	09:00:00	304.50	40.01	1.22	46.91
22.07.2015	09:30:00	305.72	37.73	0.34	86.11
22.07.2015	10:00:00	306.18	35.89	1.90	320.62
22.07.2015	10:30:00	306.89	34.81	1.83	307.83
22.07.2015	11:00:00	308.05	32.66	0.39	54.94
22.07.2015	11:30:00	306.26	42.88	3.78	260.85
22.07.2015	12:00:00	304.74	49.78	4.44	263.01
22.07.2015	12:30:00	304.34	52.21	4.65	263.50
22.07.2015	13:00:00	304.43	49.13	5.38	261.86
22.07.2015	13:30:00	304.79	44.30	5.42	259.97
22.07.2015	14:00:00	305.40	41.85	5.02	262.45
22.07.2015	14:30:00	304.58	49.78	5.38	262.86
22.07.2015	15:00:00	304.48	51.37	5.35	259.59
22.07.2015	15:30:00	304.67	53.69	4.76	263.38
22.07.2015	16:00:00	304.29	56.74	4.59	267.15
22.07.2015	16:30:00	304.10	54.55	3.89	298.07
22.07.2015	17:00:00	302.70	41.03	3.47	12.31
22.07.2015	17:30:00	303.09	35.97	4.14	29.46
22.07.2015	18:00:00	303.25	37.69	4.99	49.17
22.07.2015	18:30:00	303.47	36.81	3.76	66.52
22.07.2015	19:00:00	303.02	37.04	2.73	48.21
22.07.2015	19:30:00	301.99	40.91	1.76	358.93

22.07.2015	20:00:00	301.32	44.51	1.94	331.42
22.07.2015	20:30:00	300.59	46.64	1.18	339.01
22.07.2015	21:00:00	300.04	48.62	0.87	340.14
22.07.2015	21:30:00	299.71	50.26	1.23	325.01
22.07.2015	22:00:00	298.86	52.38	1.64	271.44
22.07.2015	22:30:00	299.33	49.52	2.07	311.76
22.07.2015	23:00:00	300.29	42.86	1.76	325.08
22.07.2015	23:30:00	299.87	55.85	2.25	317.13
23.07.2015	00:00:00	298.90	55.75	1.82	351.07

Tabella 4. Dati meteorologici relativi al 19.02.2015 rilevati dalla stazione di via Lanciani 38

Date [DD.MM.YYYY]	Time [hh:mm:ss]	Abs. Temperature [K]	Rel. Humidity [%]	WindSpeed [m/s]	WindDir [°]
19.02.2015	00:00:00	278.95	58	0.6	336
19.02.2015	00:30:00	279.15	57	1	174
19.02.2015	01:00:00	279.35	56	1.4	12
19.02.2015	01:30:00	279.15	57	1.3	7.5
19.02.2015	02:00:00	278.95	58	1.2	3
19.02.2015	02:30:00	278.85	58.5	1.25	12.5
19.02.2015	03:00:00	278.75	59	1.3	22
19.02.2015	03:30:00	278.5	59	1.2	25
19.02.2015	04:00:00	278.25	59	1.1	28
19.02.2015	04:30:00	278.05	60	1.1	22
19.02.2015	05:00:00	277.85	61	1.1	16
19.02.2015	05:30:00	277.5	62	1.5	19.5
19.02.2015	06:00:00	277.15	63	1.9	23
19.02.2015	06:30:00	276.95	64.5	1.7	38
19.02.2015	07:00:00	276.75	66	1.5	53
19.02.2015	07:30:00	277.1	64	1.65	42
19.02.2015	08:00:00	277.45	62	1.8	31
19.02.2015	08:30:00	278.4	58.5	1.5	23.5
19.02.2015	09:00:00	279.35	55	1.2	16
19.02.2015	09:30:00	280.35	51.5	1.2	25.5
19.02.2015	10:00:00	281.35	48	1.2	35
19.02.2015	10:30:00	282.35	46.5	1	23
19.02.2015	11:00:00	283.35	45	0.8	11
19.02.2015	11:30:00	284.05	46	0.95	169.5
19.02.2015	12:00:00	284.75	47	1.1	328
19.02.2015	12:30:00	285.15	47	1.25	307
19.02.2015	13:00:00	285.55	47	1.4	286
19.02.2015	13:30:00	285.6	47	1.7	291
19.02.2015	14:00:00	285.65	47	2	296
19.02.2015	14:30:00	285.75	48	2.1	288
19.02.2015	15:00:00	285.85	49	2.2	280
19.02.2015	15:30:00	285.55	52	2.35	283.5
19.02.2015	16:00:00	285.25	55	2.5	287
19.02.2015	16:30:00	284.85	57	2.3	286.5
19.02.2015	17:00:00	284.45	59	2.1	286

19.02.2015	17:30:00	284.1	61.5	1.95	280.5
19.02.2015	18:00:00	283.75	64	1.8	275
19.02.2015	18:30:00	283.55	66	1.55	281
19.02.2015	19:00:00	283.35	68	1.3	287
19.02.2015	19:30:00	283.05	69.5	1.3	316
19.02.2015	20:00:00	282.75	71	1.3	345
19.02.2015	20:30:00	282.05	73.5	1.05	215
19.02.2015	21:00:00	281.35	76	0.8	85
19.02.2015	21:30:00	280.95	78	0.65	78.5
19.02.2015	22:00:00	280.55	80	0.5	72
19.02.2015	22:30:00	280.25	82	0.6	63.5
19.02.2015	23:00:00	279.95	84	0.7	55
19.02.2015	23:30:00	279.95	84	0.7	55
20.02.2015	00:00:00	279.95	84	0.7	55

Tabella 5. Dati meteorologici relativi al 01.07.2015 rilevati dalla stazione di via Lanciani 38

Date [DD.MM.YYYY]	Time [hh:mm:ss]	Abs. Temperature [K]	Rel. Humidity [%]	WindSpeed [m/s]	WindDir [°]
01.07.2015	00:00:00	297.85	81	0.4	338
01.07.2015	00:30:00	296.95	78.5	0.6	209
01.07.2015	01:00:00	296.05	76	0.8	80
01.07.2015	01:30:00	295.85	75	0.8	72
01.07.2015	02:00:00	295.65	74	0.8	64
01.07.2015	02:30:00	295.45	75.5	0.75	60.5
01.07.2015	03:00:00	295.25	77	0.7	57
01.07.2015	03:30:00	295.05	78.5	0.65	204
01.07.2015	04:00:00	294.85	80	0.6	351
01.07.2015	04:30:00	295	79.5	0.7	194
01.07.2015	05:00:00	295.15	79	0.8	37
01.07.2015	05:30:00	296.15	73	0.85	44
01.07.2015	06:00:00	297.15	67	0.9	51
01.07.2015	06:30:00	297.9	63	1	50.5
01.07.2015	07:00:00	298.65	59	1.1	50
01.07.2015	07:30:00	299.4	57	0.95	51
01.07.2015	08:00:00	300.15	55	0.8	52
01.07.2015	08:30:00	300.9	51.5	0.85	67.5
01.07.2015	09:00:00	301.65	48	0.9	83
01.07.2015	09:30:00	302.45	44	0.95	74.5
01.07.2015	10:00:00	303.25	40	1	66
01.07.2015	10:30:00	303.7	38	1.2	35.5
01.07.2015	11:00:00	304.15	36	1.4	5
01.07.2015	11:30:00	304.4	35.5	1.5	126
01.07.2015	12:00:00	304.65	35	1.6	247
01.07.2015	12:30:00	304.4	39	2.25	236.5
01.07.2015	13:00:00	304.15	43	2.9	226
01.07.2015	13:30:00	304	43	2.8	229
01.07.2015	14:00:00	303.85	43	2.7	232
01.07.2015	14:30:00	303.75	43	2.75	236

01.07.2015	15:00:00	303.65	43	2.8	240
01.07.2015	15:30:00	303.4	45	2.65	237.5
01.07.2015	16:00:00	303.15	47	2.5	235
01.07.2015	16:30:00	302.5	51.5	2.5	243.5
01.07.2015	17:00:00	301.85	56	2.5	252
01.07.2015	17:30:00	301.65	57.5	2.1	249
01.07.2015	18:00:00	301.45	59	1.7	246
01.07.2015	18:30:00	301.15	60	1.5	238.5
01.07.2015	19:00:00	300.85	61	1.3	231
01.07.2015	19:30:00	300.35	63.5	1.35	237.5
01.07.2015	20:00:00	299.85	66	1.4	244
01.07.2015	20:30:00	299.5	67.5	1.2	262
01.07.2015	21:00:00	299.15	69	1	280
01.07.2015	21:30:00	299	71	0.85	277
01.07.2015	22:00:00	298.85	73	0.7	274
01.07.2015	22:30:00	298.65	75	0.75	275
01.07.2015	23:00:00	298.45	77	0.8	276
01.07.2015	23:30:00	298.15	79	0.6	307
02.07.2015	00:00:00	297.85	81	0.4	338

Tabella 6. Dati meteorologici relativi al 22.07.2015 rilevati dalla stazione di via Lanciani 38

Date [DD.MM.YYYY]	Time [hh:mm:ss]	Abs. Temperature [K]	Rel. Humidity [%]	WindSpeed [m/s]	WindDir [°]
22.07.2015	00:00:00	298.75	60	1.4	347
22.07.2015	00:30:00	299.45	64	1.2	345
22.07.2015	01:00:00	300.15	68	1	343
22.07.2015	01:30:00	300.35	66.5	0.7	208.5
22.07.2015	02:00:00	300.55	65	0.4	74
22.07.2015	02:30:00	300.2	64.5	0.5	67
22.07.2015	03:00:00	299.85	64	0.6	60
22.07.2015	03:30:00	299.25	67.5	0.7	189
22.07.2015	04:00:00	298.65	71	0.8	318
22.07.2015	04:30:00	298.4	71.5	0.85	323
22.07.2015	05:00:00	298.15	72	0.9	328
22.07.2015	05:30:00	298.9	69	0.95	339.5
22.07.2015	06:00:00	299.65	66	1	351
22.07.2015	06:30:00	300.65	61	1	195
22.07.2015	07:00:00	301.65	56	1	39
22.07.2015	07:30:00	302.6	53	1	49
22.07.2015	08:00:00	303.55	50	1	59
22.07.2015	08:30:00	304.3	47.5	0.9	208
22.07.2015	09:00:00	305.05	45	0.8	357
22.07.2015	09:30:00	305.95	42	0.75	337.5
22.07.2015	10:00:00	306.85	39	0.7	318
22.07.2015	10:30:00	307.45	36.5	1	305
22.07.2015	11:00:00	308.05	34	1.3	292
22.07.2015	11:30:00	308.4	34.5	1.65	276
22.07.2015	12:00:00	308.75	35	2	260

22.07.2015	12:30:00	308.55	38	2.5	254
22.07.2015	13:00:00	308.35	41	3	248
22.07.2015	13:30:00	308.6	38.5	2.65	248
22.07.2015	14:00:00	308.85	36	2.3	248
22.07.2015	14:30:00	308.4	36.5	2.15	230
22.07.2015	15:00:00	307.95	37	2	212
22.07.2015	15:30:00	306.2	40.5	2.95	275
22.07.2015	16:00:00	304.45	44	3.9	338
22.07.2015	16:30:00	303.4	47	3.4	186.5
22.07.2015	17:00:00	302.35	50	2.9	35
22.07.2015	17:30:00	302.6	48.5	2.35	33.5
22.07.2015	18:00:00	302.85	47	1.8	32
22.07.2015	18:30:00	302	51.5	1.7	189
22.07.2015	19:00:00	301.15	56	1.6	346
22.07.2015	19:30:00	301.4	54	1.35	345.5
22.07.2015	20:00:00	301.65	52	1.1	345
22.07.2015	20:30:00	301.85	49.5	1.05	179.5
22.07.2015	21:00:00	302.05	47	1	14
22.07.2015	21:30:00	301.95	45.5	1.1	23
22.07.2015	22:00:00	301.85	44	1.2	32
22.07.2015	22:30:00	301.45	45.5	1.3	36.5
22.07.2015	23:00:00	301.05	47	1.4	41
22.07.2015	23:30:00	299.9	61.7	1.4	194
23.07.2015	00:00:00	298.75	61.6	1.4	347

Poiché i dati della stazione meteorologica di via Lanciani 38 erano disponibili con un passo orario, i dati relativi alle mezz'ore sono stati ottenuti per interpolazione dei dati orari così come alcuni dati mancanti (i.e., valori in rosso). Mentre, per quel che riguarda i dati mancanti relativi alla stazione meteorologica di Castel di Guido (i.e., valori evidenziati in giallo), i dati mancanti sono stati ottenuti prima correlando i dati delle due stazioni meteorologiche e poi trovando l'equazione di regressione.

Per ciascuna delle tre date in cui è stata analizzata l'UHI, sono state studiate le correlazioni tra i parametri usati come forzanti nel modello ENVI-met. A tal riguardo, non sono state utilizzate la radiazione solare e la copertura nuvolosa come forzanti del modello ENVI-met, pertanto nelle analisi sono state omesse.

In Figura 2-Figura 5 sono riportate le analisi di correlazione tra i parametri meteorologici rilevati dalle due centraline durante il 19 febbraio 2015. In particolare, le figure 2-5, mostrano il coefficiente di determinazione per le variabili analizzate e l'equazione di regressione. È possibile notare che le temperature registrate a Castel di Guido sono predette in modo efficace dalle temperature registrate in via Lanciani 38, in quanto il coefficiente di determinazione è pari a 0.98.

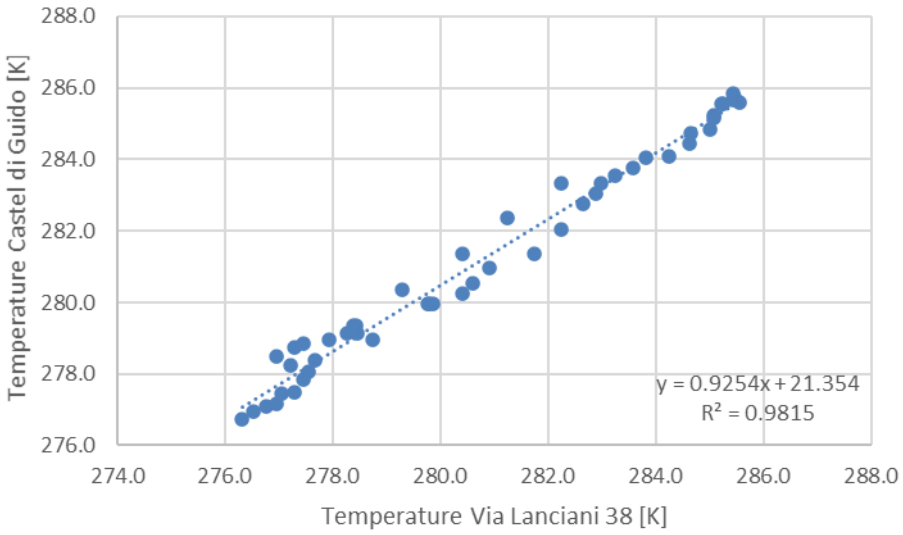


Figura 2. Analisi di correlazione delle temperature dell'aria per il giorno 19/02/2015

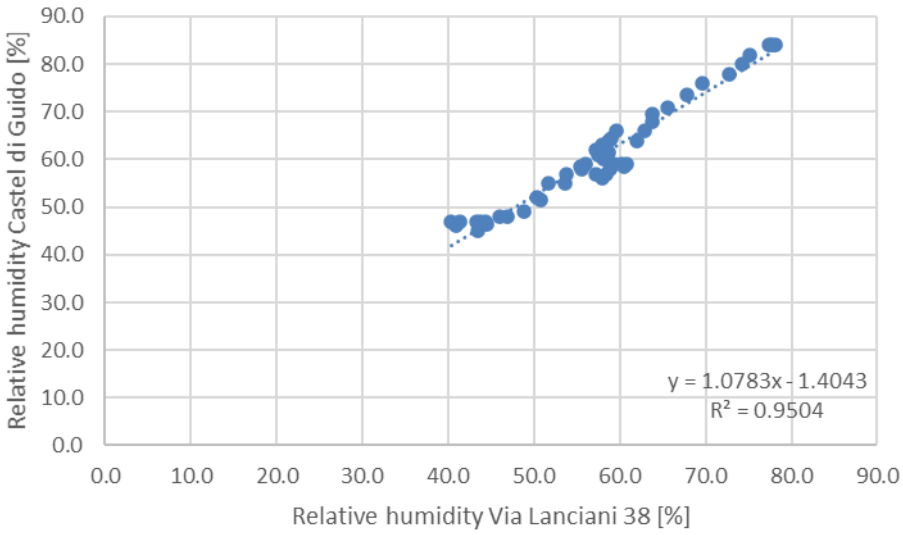


Figura 3. Analisi di correlazione delle umidità relative per il giorno 19/02/2015

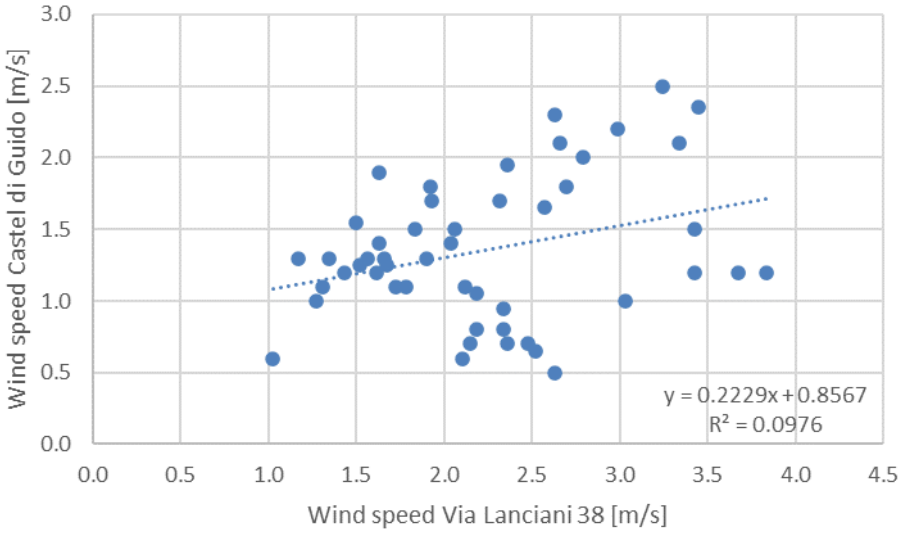


Figura 4. Analisi di correlazione delle velocità del vento per il giorno 19/02/2015

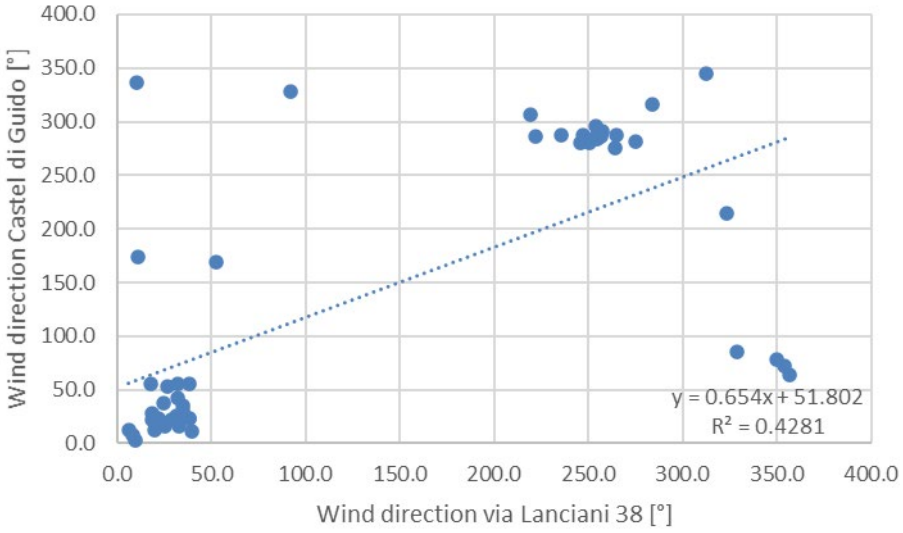


Figura 5. Analisi di correlazione delle direzioni del vento per il giorno 19/02/2015

Similmente, è possibile notare che anche l'umidità relativa registrata a Castel di Guido è predetta bene dall'umidità relativa registrata in via Lanciani 38, poiché il coefficiente di determinazione è pari a 0.95. Contrariamente, la velocità del vento e la direzione del vento presentano coefficienti di determinazioni molto più bassi, ovvero pari a 0.097 e 0.4, rispettivamente. Dati i bassi coefficienti di determinazione relativi alla velocità e alla direzione del vento, questi parametri non verranno confrontati in futuro con quelli derivanti dalla modellazione ENVI-met nel calcolo dell'errore poiché potrebbero risultare fuorvianti.
In Figura 6-Figura 9 sono state riportate le analisi effettuate sui parametri meteorologici rilevati dalla due stazioni nel giorno 1° luglio 2015. È possibile notare che le temperature e i valori di umidità relativa registrati a Castel di Guido possono essere predette in modo efficace da quelli rilevati in Via Lanciani 38, essendo i coefficienti di determinazione pari a 0.96 e a 0.95, rispettivamente.

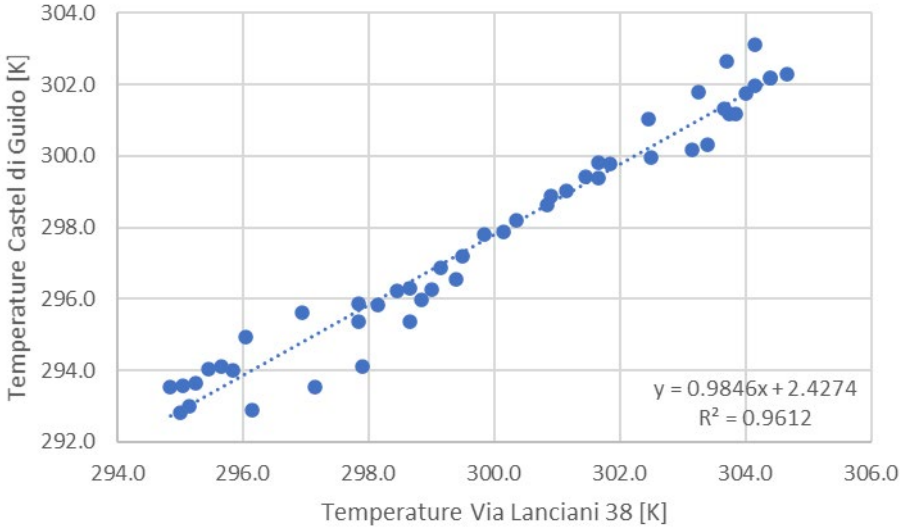


Figura 6. Analisi di correlazione delle temperature dell'aria per il giorno 01/07/2015

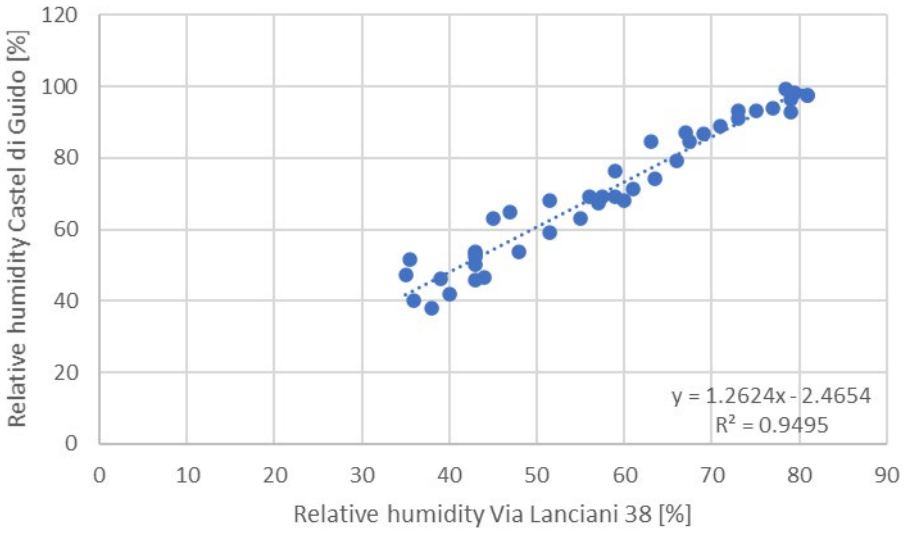


Figura 7. Analisi di correlazione dell'umidità relativa per il giorno 01/07/2015

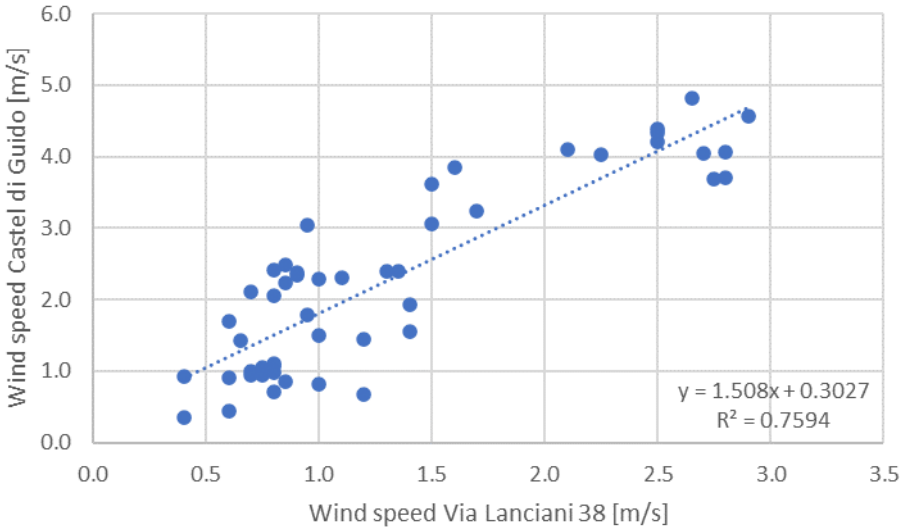


Figura 8. Analisi di correlazione delle velocità del vento per il giorno 01/07/2015

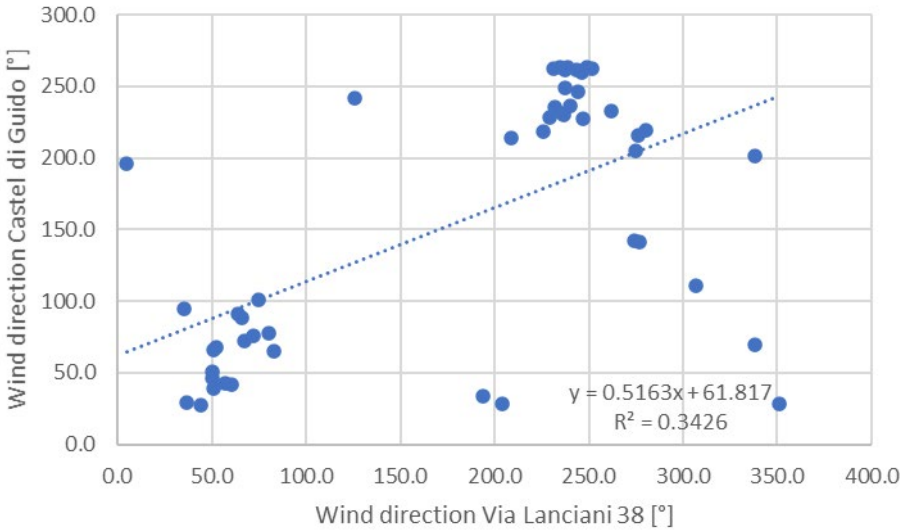


Figura 9. Analisi di correlazione delle direzioni del vento per il giorno 01/07/2015

Al contrario, la velocità del vento e la direzione del vento mostrano coefficienti di determinazione più bassi, pari a 0.76 e 0.34, rispettivamente. Pertanto, anche in questo caso, gli *output* della modellazione ENVI-met verranno confrontati con i soli valori di temperatura dell'aria e di umidità relativa per determinare l'errore e non con quelli di velocità e direzione del vento.
Le analisi relative al coefficiente di determinazione per i parametri meteorologici relativi alle due stazioni sono state condotte anche per il 22 luglio 2015, ovvero la giornata caratterizzata dall'ondata di calore. In questo caso, le temperature dell'aria rilevate dalle due stazioni meteorologiche mostrano un buon coefficiente di determinazione, pari a 0.80, che, tuttavia, risulta inferiore a quello trovato per le due giornate rappresentative della stagione invernale ed estiva.

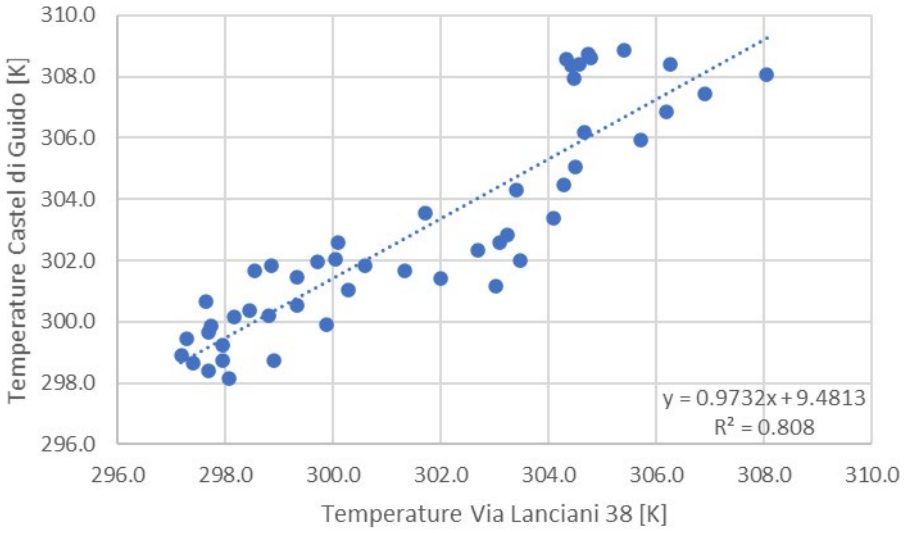


Figura 10. Analisi di correlazione delle temperature dell'aria per il giorno 22/07/2015

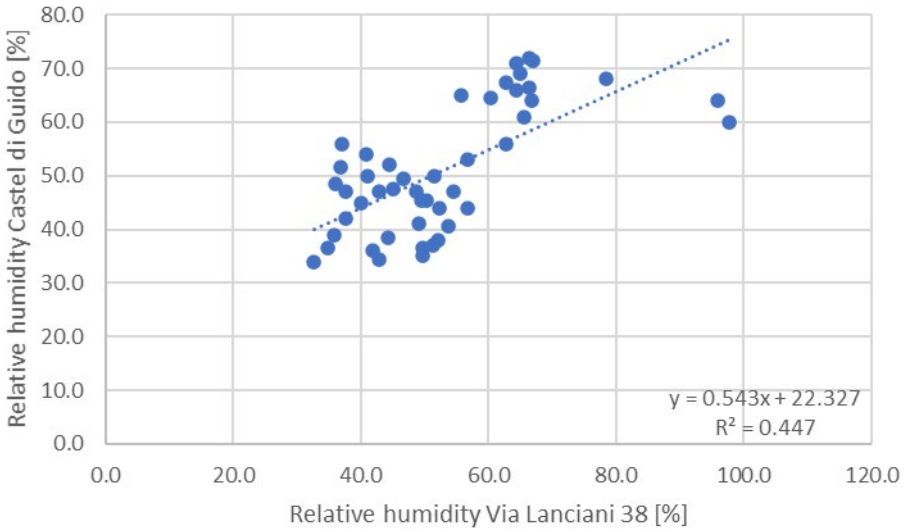


Figura 11. Analisi di correlazione dell'umidità relativa per il giorno 22/07/2015

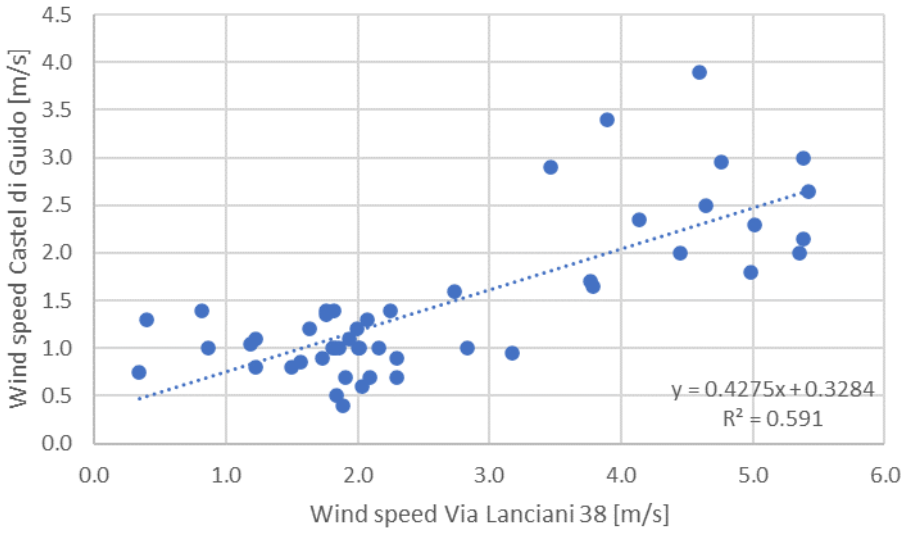


Figura 12. Analisi di correlazione delle velocità del vento per il giorno 22/07/2015

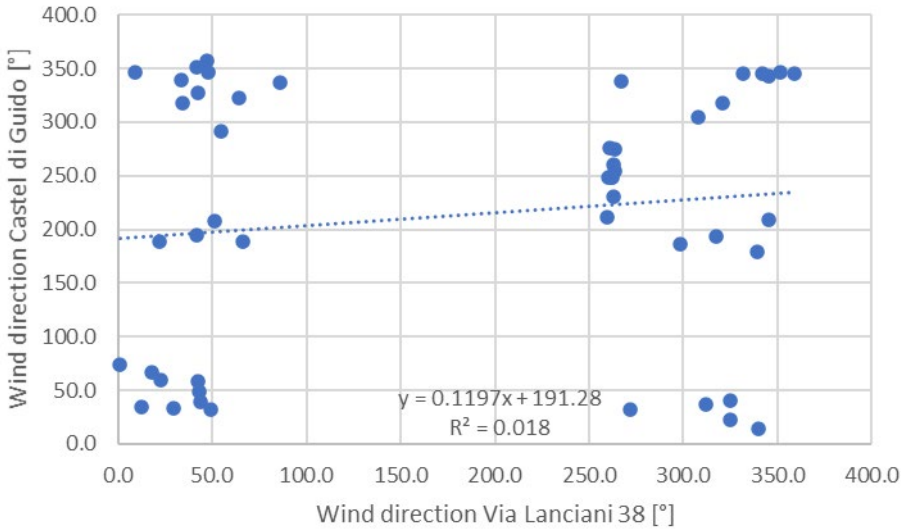


Figura 13. Analisi di correlazione delle direzioni del vento per il giorno 22/07/2015

Invece, i dati relativi all'umidità relativa, alla velocità e alla direzione del vento mostrano coefficienti di determinazione molto più bassi, paria a 0.45, 0.59 2 0.02, rispettivamente. Pertanto, per il 22 luglio 2017, questi tre parametri non verranno confrontati con gli *output* del modello ENVI-met per determinare l'errore relativo alla simulazione.

1.3 Isola di calore urbana

È stata calcolata l'UHI relativa all'area urbana selezionata nella città di Roma per le tre giornate.

Per la giornata tipica invernale (i.e., 19 febbraio 2015) è stata trovata una UHI media di 0.4 °C. Ovvero, è stata trovata una differenza di temperatura dell'aria tra via Lanciani 38 e l'area rurale di Castel di Guido pari a 0.4 °C con picchi al mattino, alle ore 03.00-03.30 e alle ore 09.00, pari a 1.5 e 1 °C, rispettivamente (Figura 14). Invece, nel pomeriggio e in serata la differenza di temperatura dell'aria tra via Lanciani 38 e Castel di Guido diminuisce al di sotto dei 0.5 °C e, dalle 16.30 alle 18.00, dalle 20.30-21.00 e alle 22.30, tale differenza diventa negativa, risultando che la temperatura dell'aria in via Lanciani 38 è più bassa rispetto a Castel di Guido fino ad un massimo di 0.4 °C (Figura 14). È tuttavia necessario sottolineare che i dati meteorologici sono rilevati dalle due centraline ad altezze diverse. Infatti, la centralina di Via Lanciani 38 è posta sul solaio di copertura di un edificio alto circa 20 m, mentre la centralina di Castel di Guido è posizionata a terra e quindi

i dati sono registrati ad un'altezza di circa 3 m dal suolo. Questa differenza di altezza potrebbe portare a sottostimare l'UHI.

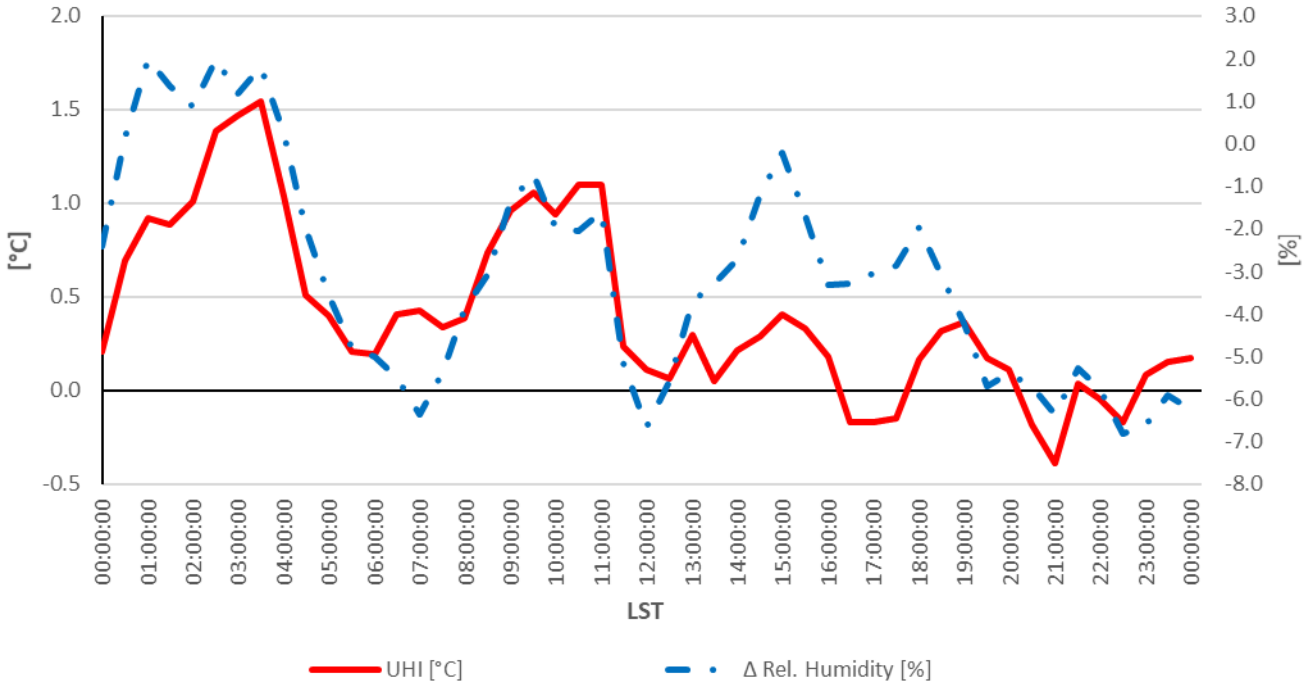


Figura 14. UHI e differenza di umidità relativa per il giorno 19/02/2015

La Figura 14 mostra, inoltre, la differenza di umidità relativa tra i dati rilevati dalla stazione sita in Via Lanciani 38 e quella in Castel di Guido. È facile osservare che l'andamento della differenza di umidità ricalca abbastanza bene l'andamento delle differenze di temperatura. Tuttavia, i dati della stazione di Castel di Guido mostrano una maggiore umidità relativa dell'aria rispetto a quelli di via Lanciani 38. Questo risultato dipende certamente dalla vicinanza della stazione di Castel di Guido al mare. Risulta infatti che l'umidità relativa registrata a Castel di Guido sia, in media, superiore del 3.1% con punte di circa il 6-7% alle ore 07.00, alle ore 12.00 e alle ore 23.00 (Figura 14). Tuttavia, tra le 01.00 e le 04.00 l'umidità relativa in via Lanciani è superiore rispetto a quella registrata a Castel di Guido (Figura 14).

Similmente, è stata investigata la differenza tra la velocità del vento registrata dalle due stazioni. È stato trovato che la velocità del vento in località Castel di Guido è maggiore rispetto alla velocità del vento in via Lanciani (Figura 15). In particolare, si è trovato che, in media, la velocità del vento è maggiore di 0.9 m/s a Castel di Guido rispetto a via Lanciani con punte massime di 2.6 m/s alle ore 10.00, di 2.5 m/s alle ore 09.00 e di 2.1 m/s alle ore 22.00; la maggiore ventosità registrata a Castel di Guido è probabilmente dovuta alla maggiore vicinanza al mare e alla mancanza di ostacoli fisici che ne possano ridurre la velocità. La Figura 15 mostra anche che alle ore 18.30-19.00 e alle ore 06.00 la velocità del vento in via Lanciani è maggiore rispetto a quella in Castel di Guido di 0.1 e 0.3 m/s, rispettivamente.

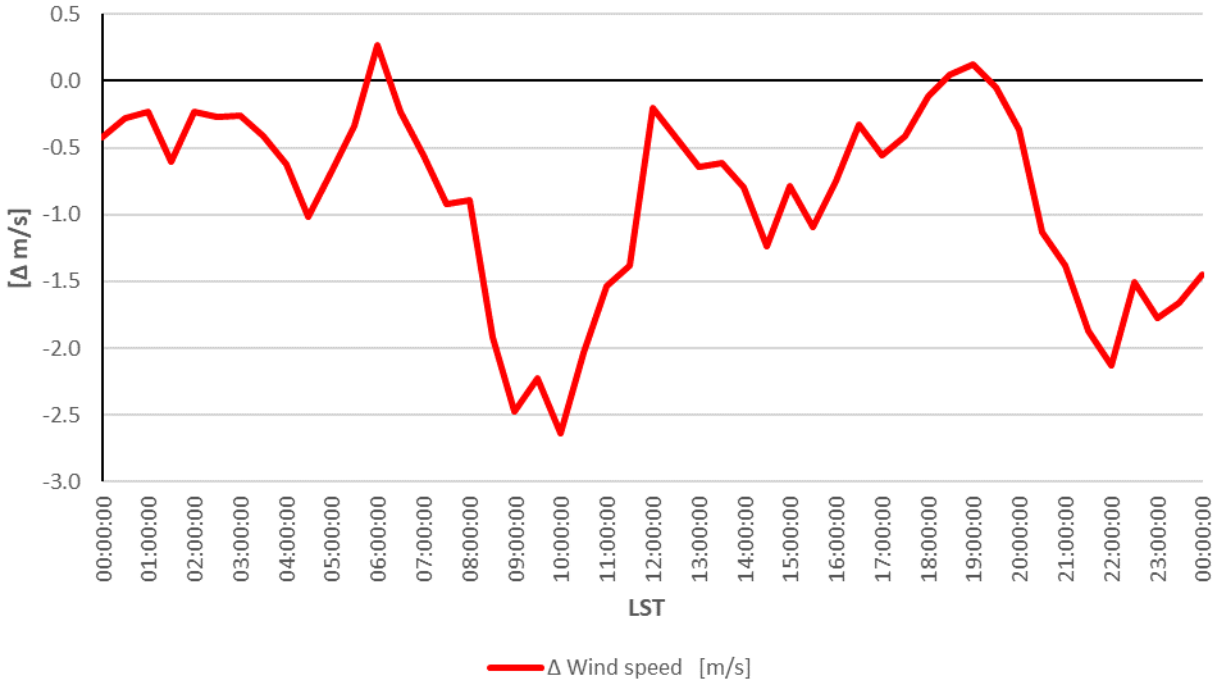


Figura 15. Differenza nella velocità del vento per il giorno 19/02/2015

La Figura 16 mostra che durante una giornata tipica estiva (i.e., 01 luglio 2015) l'UHI di Roma raggiunge una magnitudo di circa 4 °C. La magnitudo media della UHI è di 2.2 °C, il picco massimo di 3.8 °C viene raggiunto alle 07.00, dopo di che la UHI diminuisce fino ad un minimo di 1 °C registrato alle ore 11.00 e poi aumenta fino alle 15.30 quando raggiunge i 3.1 °C, ridiscende fino a 2 °C e risale a 2.9 °C alle 22.00.

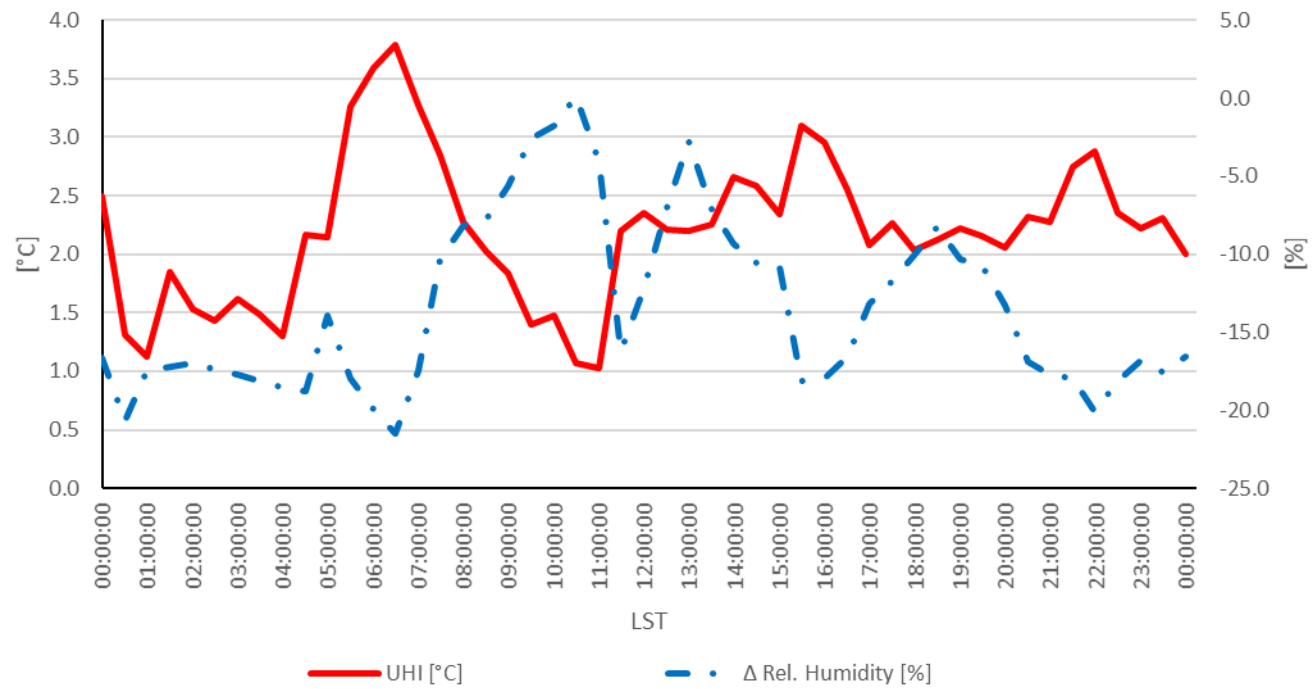


Figura 16. UHI e differenza di umidità relativa per il giorno 01/07/2015

L'umidità relativa rilevata in via Lanciani risulta essere inferiore rispetto a quella rilevata a Castel di Guido; ancora una volta la maggiore umidità relativa a Castel di Guido è ragionevolmente dovuta alla vicinanza al mare (Figura 16). In particolare, si è trovato che, in media, Castel di Guido ha un'umidità superiore rispetto a via Lanciani del 13.4% con punte del 21.5% alle ore 6.30 e di 20.1% alle ore 22.00 (Figura 16).

Inoltre, sono state analizzate anche le velocità del vento e si è visto che mediamente la velocità del vento è maggiore a Castel di Guido di 1 m/s con punte di 2.1 m/s alle ore 07.30 e di 2.2 m/s alle 12.00 e alle ore 15.30 (Figura 17). Mentre, in via Lanciani la velocità del vento supera quella di Castel di Guido di 0.5 m/s alle 10.30 e di 0.2 m/s alle 21.00 (Figura 17).

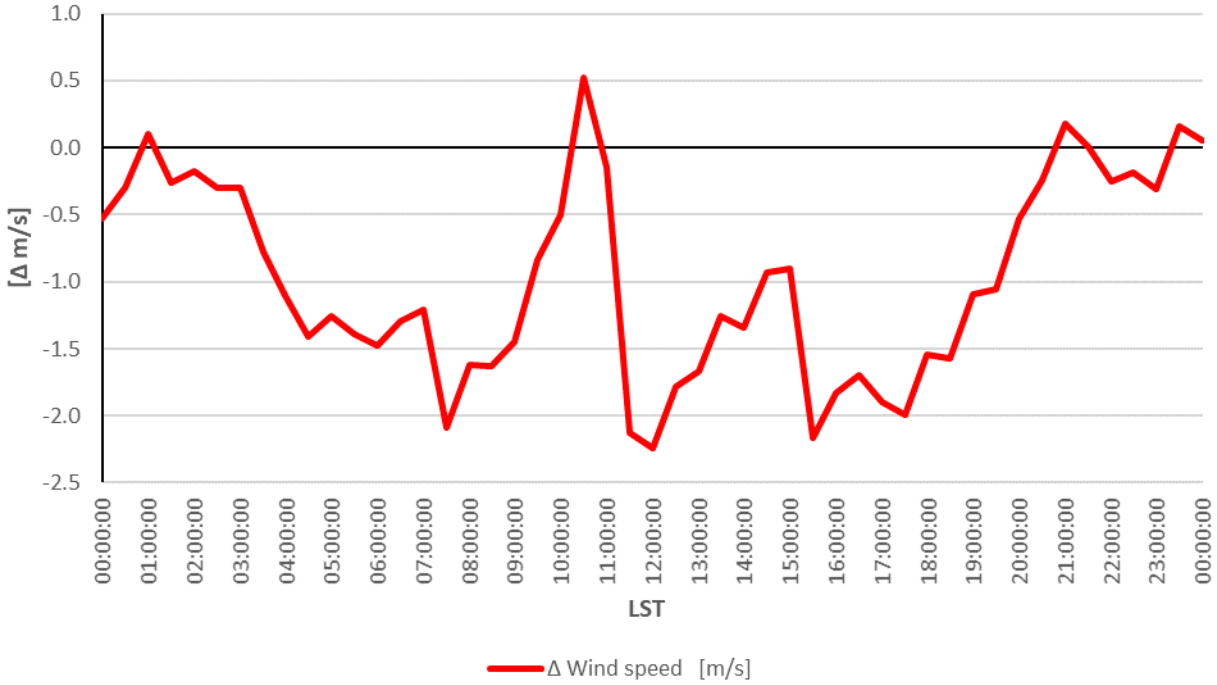


Figura 17. Differenza nella velocità del vento per il giorno 01/07/2015

In modo analogo è stata indagata anche l'UHI durante un'ondata di calore (i.e., 22 luglio 2015) così come la differenza della ventosità rilevata dalle due centraline meteorologiche.
La Figura 18 mostra che l'isola di calore rilevata in via Lanciani 38 ha una magnitudo media di 1.4 °C con picchi di 4.2 °C alle ore 12.30, di 3.8 °C alle ore 14.30 e di 3 °C alle ore 22.00; mentre, alle ore 19.00 la temperatura registrata in via Lanciani è di 1.9 °C inferiore rispetto a quella registrata a Castel di Guido. Confrontando i valori dell'UHI rilevati durante un'ondata di calore (i.e., 22 luglio 2015) con quelli registrati durante una giornata estiva tipica (i.e., 01 luglio 2015) si può notare che la massima magnitudo dell'isola di calore è abbastanza simile (i.e., 4 °C per una giornata tipica estiva e 4.2 °C per il 22 luglio 2015). Infatti, risulta che seppure la temperatura media in via Lanciani registrata durante l'ondata di calore sia superiore (i.e., 29.8 °C) di ben 3 °C rispetto a quella registrata in un giorno tipico estivo (i.e., 26.8 °C), l'UHI risulta molto simile poiché la temperatura media registrata durante un'ondata di calore a Castel di Guido (i.e., 28.4 °C) è superiore di circa 4 °C rispetto ad una giornata tipica estiva (i.e., 24.6 °C).
È possibile notare, inoltre, che in media l'umidità relativa registrata in via Lanciani è inferiore, rispetto a quella registrata a Castel di Guido, dell'1.9%. Tuttavia, la Figura 18 mostra anche ore della giornata in cui l'umidità relativa in via Lanciani è superiore, anche di circa il 20% (i.e., alle ore 19.00). Valori di umidità alti insieme a

temperature anch'esse alte determinano un ambiente urbano inospitale e soprattutto poco salubre.

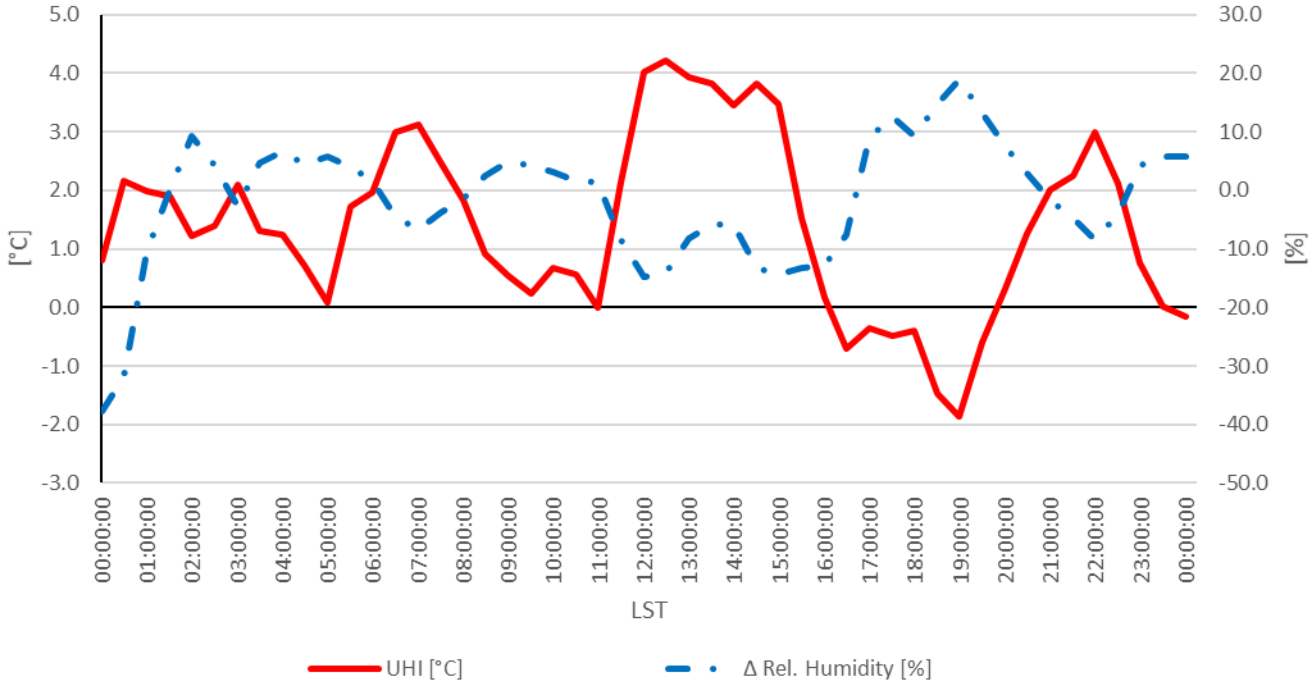


Figura 18. UHI e differenza di umidità relativa per il giorno 22/07/2015

In Figura 19 sono mostrate le differenze tra le velocità del vento registrate in via Lanciani e a Castel di Guido.

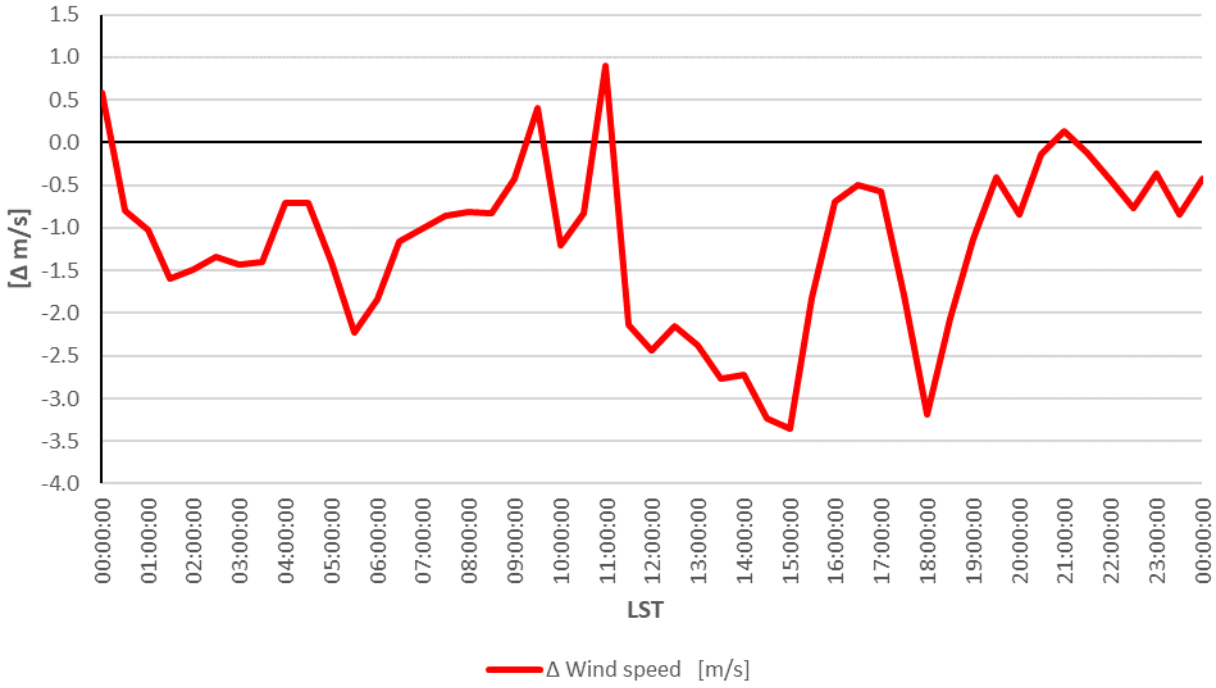


Figura 19. Differenza nella velocità del vento per il giorno 22/07/2015

Dall'analisi dei dati relativi alla ventosità risulta che in media la velocità del vento è di 1.2 m/s inferiore in via Lanciani rispetto a Castel di Guido; tuttavia, si registrano punte di -3.4 m/s alle ore 15.00 e di -3.2 m/s alle ore 18.00. Solo pochi sono i casi in cui, durante la giornata del 22 luglio 2015, la velocità del vento è superiore in via Lanciani rispetto a Castel di Guido, ovvero alle ore 00.00, alle ore 09.30, alle ore 11.00 e alle ore 21.00. In particolare, alle ore 11.00 si registra che la velocità del vento in via Lanciani è maggiore di 0.9 m/s rispetto a Castel di Guido (Figura 19).

2 Isola di calore urbana a Torino

2.1 Stazioni meteorologiche

Al fine di forzare il modello ENVI-met con dati meteorologici per le condizioni meteorologiche al contorno del dominio di calcolo, sono stati scaricati i dati relativi alla stazione meteorologica dell'Aeroporto di Caselle Torinese [9].

La stazione meteorologica dell'Aeroporto di Caselle Torinese è sita presso l'aeroporto Internazionale di Caselle Torinese, a Nord di Torino, in un'area rurale a circa 13 km dalla stazione meteorologica di via Beaulard 7. Quest'ultima è sita in un'area densamente urbanizzata di Torino (Figura 20).

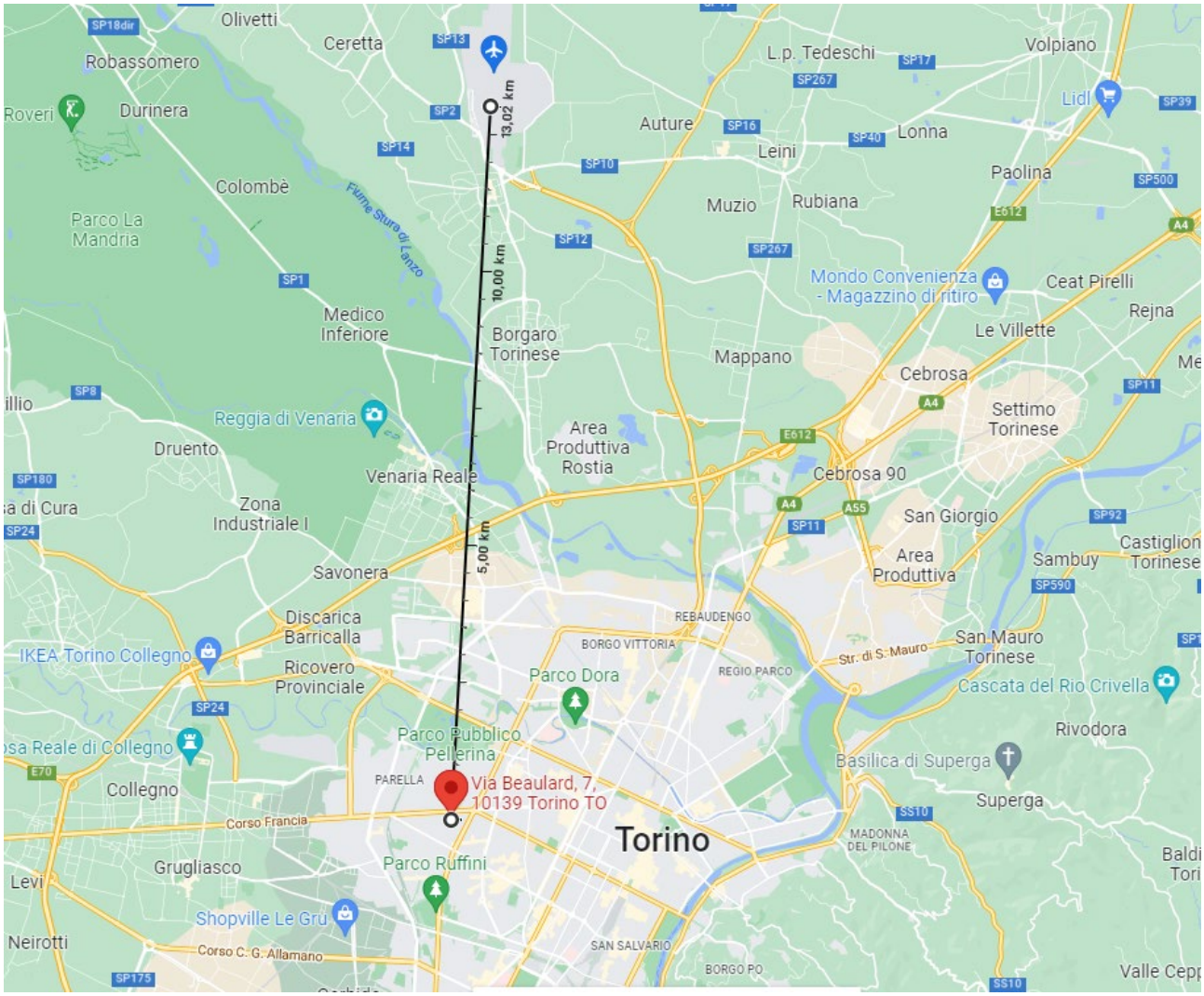


Figura 20. Individuazione delle stazioni meteorologiche di Castelle Torinese Aeroporto e di via Beaulard 7, Torino

I dati meteorologici rilevati dalle due stazioni possono, in ragione della localizzazione di quest'ultime, essere utilizzati per identificare la magnitudo dell'isola di calore di Torino. In particolare, i dati delle due stazioni meteorologiche sono stati utilizzati per identificare l'UHI di una giornata tipica invernale, ovvero il 19 gennaio 2016, tipica di una giornata estiva, ovvero il 27 luglio 2014, e in presenza di un'ondata di calore, con riferimento alla giornata del 7 luglio 2015.

2.2 Dati e coefficienti di determinazione

I dati meteorologici utilizzati per forzare le condizioni al contorno del dominio e per il calcolo delle isole di calore urbane di Torino sono riportati nelle tabelle da Tabella 7 a Tabella 12.

Tabella 7. Dati meteorologici relativi al 19.01.2016 rilevati dalla stazione di Caselle Torinese Aeroporto

Data	Ora	Temperatura [K]	Umidità relativa [%]	Velocità del vento [m/s]
19/01/2016	0	270.8	57.0	0.0
19/01/2016	1	271.1	56.0	1.8
19/01/2016	2	270.9	48.0	1.6
19/01/2016	3	270.2	60.0	2.2
19/01/2016	4	270.0	62.0	1.5
19/01/2016	5	269.3	67.0	0.5
19/01/2016	6	269.9	60.0	1.9
19/01/2016	7	269.2	66.0	0.9
19/01/2016	8	270.1	63.0	0.7
19/01/2016	9	271.0	55.0	0.7
19/01/2016	10	272.2	56.0	1.1
19/01/2016	11	273.1	50.0	1.3
19/01/2016	12	275.3	41.0	1.5
19/01/2016	13	276.3	32.0	1.6
19/01/2016	14	277.7	28.0	1.8
19/01/2016	15	277.6	24.0	1.3
19/01/2016	16	276.2	32.0	1.2
19/01/2016	17	274.5	32.0	1.6
19/01/2016	18	273.2	42.0	1.7
19/01/2016	19	273.0	47.0	1.7
19/01/2016	20	272.1	51.0	1.3
19/01/2016	21	270.7	59.0	1.5
19/01/2016	22	269.3	65.0	1.1
19/01/2016	23	271.2	56.0	0.9

Tabella 8. Dati meteorologici relativi al 27.07.2014 rilevati dalla stazione di Caselle Torinese Aeroporto

Data	Ora	Temperatura [K]	Umidità relativa [%]	Velocità del vento [m/s]
27/07/2014	0	292.6	85.0	2.0
27/07/2014	1	292.1	88.0	2.3
27/07/2014	2	291.5	90.0	1.7
27/07/2014	3	290.3	90.0	1.5
27/07/2014	4	289.9	93.0	0.5
27/07/2014	5	289.0	92.0	1.5
27/07/2014	6	288.8	92.0	1.8
27/07/2014	7	288.9	92.0	0.9
27/07/2014	8	293.4	81.0	0.9
27/07/2014	9	295.5	70.0	1.2
27/07/2014	10	296.5	69.0	1.6
27/07/2014	11	297.1	67.0	1.8
27/07/2014	12	297.6	65.0	1.5
27/07/2014	13	299.5	58.0	1.9
27/07/2014	14	300.6	54.0	1.3
27/07/2014	15	301.6	52.0	1.8
27/07/2014	16	302.6	48.0	1.9
27/07/2014	17	303.2	40.0	2.0
27/07/2014	18	303.4	41.0	2.6
27/07/2014	19	302.6	37.0	2.3
27/07/2014	20	299.5	70.0	3.5
27/07/2014	21	296.6	82.0	2.6
27/07/2014	22	296.2	80.0	3.6
27/07/2014	23	296.0	79.0	2.4

Tabella 9. Dati meteorologici relativi al 07.07.2015 rilevati dalla stazione di Caselle Torinese Aeroporto

Data	Ora	Temperatura [K]	Umidità relativa [%]	Velocità del vento [m/s]
07/07/2015	0	299.8	75.0	2.3
07/07/2015	1	300.4	74.0	1.6

07/07/2015	2	299.3	85.0	2.0
07/07/2015	3	299.5	80.0	1.2
07/07/2015	4	299.0	81.0	0.9
07/07/2015	5	298.6	85.0	0.5
07/07/2015	6	297.7	92.0	1.2
07/07/2015	7	299.3	83.0	2.3
07/07/2015	8	300.4	78.0	2.6
07/07/2015	9	301.9	74.0	1.7
07/07/2015	10	302.9	71.0	2.2
07/07/2015	11	303.7	68.0	2.2
07/07/2015	12	305.3	61.0	1.8
07/07/2015	13	305.7	60.0	1.7
07/07/2015	14	306.7	57.0	2.3
07/07/2015	15	307.4	53.0	1.7
07/07/2015	16	308.8	47.0	1.5
07/07/2015	17	308.0	51.0	1.7
07/07/2015	18	305.7	63.0	2.3
07/07/2015	19	304.7	69.0	3.4
07/07/2015	20	304.1	73.0	1.8
07/07/2015	21	302.7	78.0	2.2
07/07/2015	22	301.2	80.0	2.3
07/07/2015	23	300.8	84.0	2.0

Tabella 10. Dati meteorologici relativi al 19.01.2016 rilevati dalla stazione di via Beaulard 7

Data	Ora	Temperatura [K]	Umidità relativa [%]	Velocità del vento [m/s]
19/01/2016	0	270.8	57.0	0.0
19/01/2016	1	271.1	56.0	1.8
19/01/2016	2	270.9	48.0	1.6
19/01/2016	3	270.2	60.0	2.2
19/01/2016	4	270.0	62.0	1.5
19/01/2016	5	269.3	67.0	0.5
19/01/2016	6	269.9	60.0	1.9
19/01/2016	7	269.2	66.0	0.9
19/01/2016	8	270.1	63.0	0.7
19/01/2016	9	271.0	55.0	0.7
19/01/2016	10	272.2	56.0	1.1
19/01/2016	11	273.1	50.0	1.3
19/01/2016	12	275.3	41.0	1.5
19/01/2016	13	276.3	32.0	1.6
19/01/2016	14	277.7	28.0	1.8
19/01/2016	15	277.6	24.0	1.3
19/01/2016	16	276.2	32.0	1.2
19/01/2016	17	274.5	32.0	1.6
19/01/2016	18	273.2	42.0	1.7
19/01/2016	19	273.0	47.0	1.7
19/01/2016	20	272.1	51.0	1.3
19/01/2016	21	270.7	59.0	1.5
19/01/2016	22	269.3	65.0	1.1
19/01/2016	23	271.2	56.0	0.9

Tabella 11. Dati meteorologici relativi al 27.07.2014 rilevati dalla stazione di via Beaulard 7

Data	Ora	Temperatura [K]	Umidità relativa [%]	Velocità del vento [m/s]
27/07/2014	0	292.9	86.0	0.5
27/07/2014	1	292.6	87.0	0.4
27/07/2014	2	292.1	88.0	0.2
27/07/2014	3	291.8	88.0	0.3
27/07/2014	4	291.3	87.0	0.3
27/07/2014	5	290.8	86.0	0.6
27/07/2014	6	291.4	84.0	0.1

27/07/2014	7	293.3	78.0	0.1
27/07/2014	8	295.2	72.0	0.3
27/07/2014	9	296.7	67.0	0.6
27/07/2014	10	297.9	63.0	0.6
27/07/2014	11	298.9	58.0	0.6
27/07/2014	12	300.4	53.0	1.0
27/07/2014	13	301.3	47.0	1.3
27/07/2014	14	301.9	44.0	1.6
27/07/2014	15	302.3	42.0	1.7
27/07/2014	16	302.3	40.0	1.9
27/07/2014	17	302.1	40.0	1.8
27/07/2014	18	302.0	36.0	1.1
27/07/2014	19	301.6	37.0	0.7
27/07/2014	20	299.9	56.0	0.4
27/07/2014	21	297.7	72.0	0.9
27/07/2014	22	297.1	71.0	0.6
27/07/2014	23	296.9	71.0	0.2

Tabella 12. Dati meteorologici relativi al 07.07.2015 rilevati dalla stazione di via Beaulard 7

Data	Ora	Temperatura [K]	Umidità relativa [%]	Velocità del vento [m/s]
07/07/2015	0	301.8	64.0	0.2
07/07/2015	1	300.9	73.0	0.5
07/07/2015	2	300.2	76.0	0.6
07/07/2015	3	299.9	79.0	0.5
07/07/2015	4	300.1	78.0	0.1
07/07/2015	5	300.2	77.0	0.0
07/07/2015	6	300.1	78.0	0.6
07/07/2015	7	300.9	72.0	0.4
07/07/2015	8	302.1	68.0	0.9
07/07/2015	9	303.3	66.0	0.9
07/07/2015	10	304.7	60.0	0.8
07/07/2015	11	305.6	58.0	0.8
07/07/2015	12	305.7	58.0	1.1
07/07/2015	13	305.8	58.0	1.2
07/07/2015	14	306.9	53.0	0.8
07/07/2015	15	307.3	51.0	0.9
07/07/2015	16	307.4	50.0	1.2
07/07/2015	17	306.8	52.0	1.2
07/07/2015	18	306.1	56.0	1.0
07/07/2015	19	305.5	56.0	1.0
07/07/2015	20	304.9	53.0	0.8
07/07/2015	21	303.9	57.0	0.8
07/07/2015	22	302.8	64.0	0.5
07/07/2015	23	301.9	67.0	0.6

Per ciascuna delle tre date in cui è stata analizzata l'UHI, sono state studiate le correlazioni tra i parametri usati come forzanti nel modello ENVI-met. A tal riguardo, non sono state utilizzate la radiazione solare e la copertura nuvolosa come forzanti del modello ENVI-met, pertanto nelle analisi sono state omesse. Analogamente la direzione del vento è stata forzata come una costante pari a 22.5°, che corrisponde alla direzione principale dei venti nella zona di Torino analizzata ed è stata omessa nelle analisi.
Nelle figure da Figura 21 a Figura 23 sono riportate le analisi di correlazione tra i parametri meteorologici rilevati dalle due centraline il 19 gennaio 2016. In particolare, le figure da Figura 21 a Figura 23 mostrano il coefficiente di determinazione per le variabili analizzate e l'equazione di regressione. È possibile notare che le temperature registrate all'Aeroporto di Caselle sono predette dalle temperature registrate in via Beaulard 7 con un coefficiente di determinazione pari a 0.89.
Similmente, è possibile notare che anche l'umidità relativa registrata all'Aeroporto di Caselle Torinese è predetta bene dall'umidità relativa registrata in via Beaulard 7, con il coefficiente di determinazione pari a 0.87. Contrariamente, la velocità del vento del vento presenta un coefficiente di determinazione molto più

basso, pari a 0.006. Dato il baso valore del coefficiente R^2 relativo alla velocità, questo parametro non sarà confrontati in futuro con quello derivante dalla modellazione ENVI-met nel calcolo dell'errore.

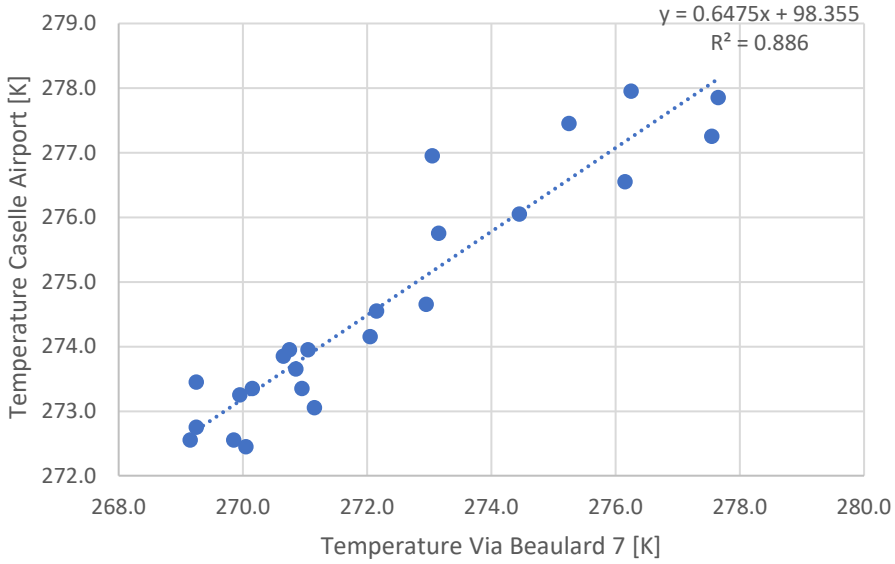


Figura 21. Analisi di correlazione delle temperature dell'aria per il giorno 19/01/2016

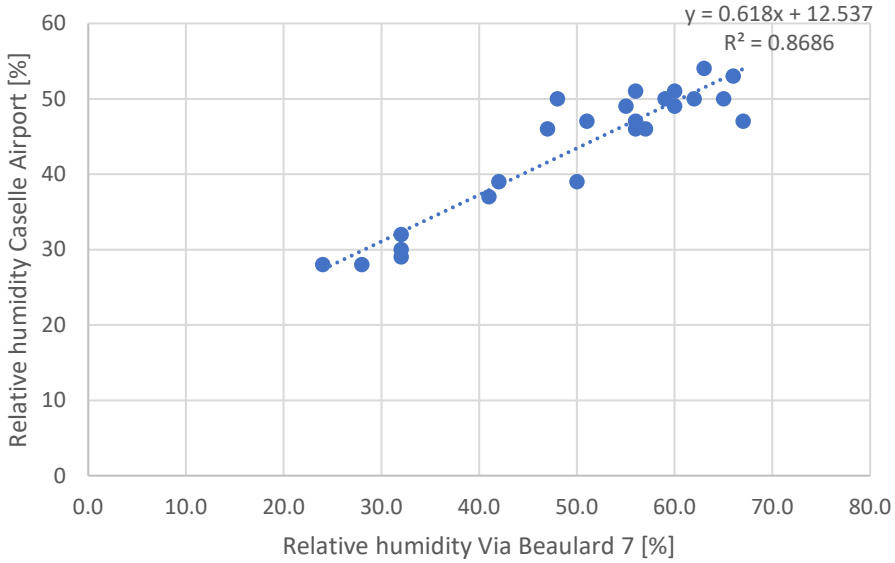


Figura 22. Analisi di correlazione delle umidità relative per il giorno 19/01/2016

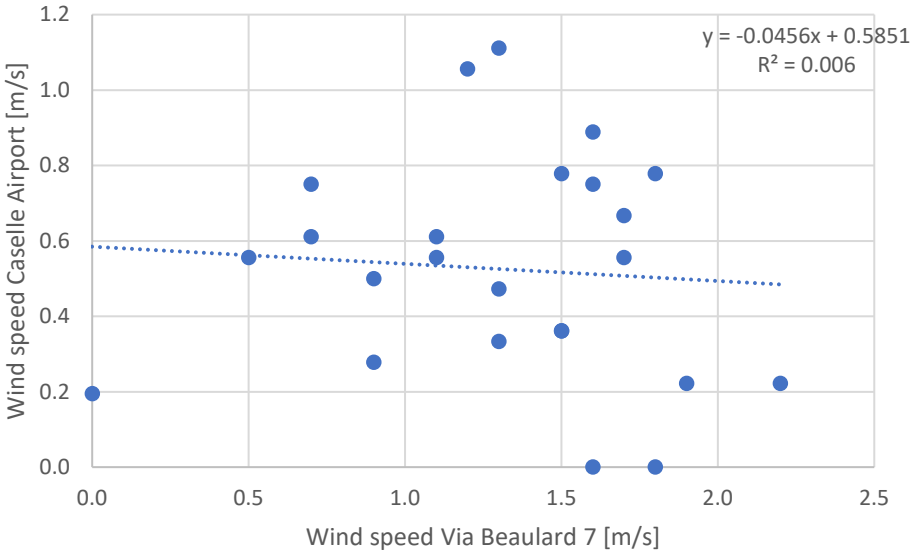


Figura 23. Analisi di correlazione delle velocità del vento per il giorno 19/01/2016

Nelle figure da Figura 24 a Figura 26 sono state riportate le analisi effettuate sui parametri meteorologici rilevati dalle due stazioni nel giorno 27 luglio 2014. È possibile notare che le temperature e i valori di umidità relativa registrati a Caselle Torinese possono essere predetti da quelli rilevati in via Beaulard 7 in maniera efficace, con coefficienti di determinazione pari a 0.94 per entrambe le grandezze.
La velocità del vento, invece, mostra un coefficiente di determinazione molto basso, pari a 0.008. Anche in questo caso, gli *output* della modellazione ENVI-met verranno confrontati con i soli valori di temperatura dell'aria e di umidità relativa per determinare l'errore e non con quelli della velocità del vento.

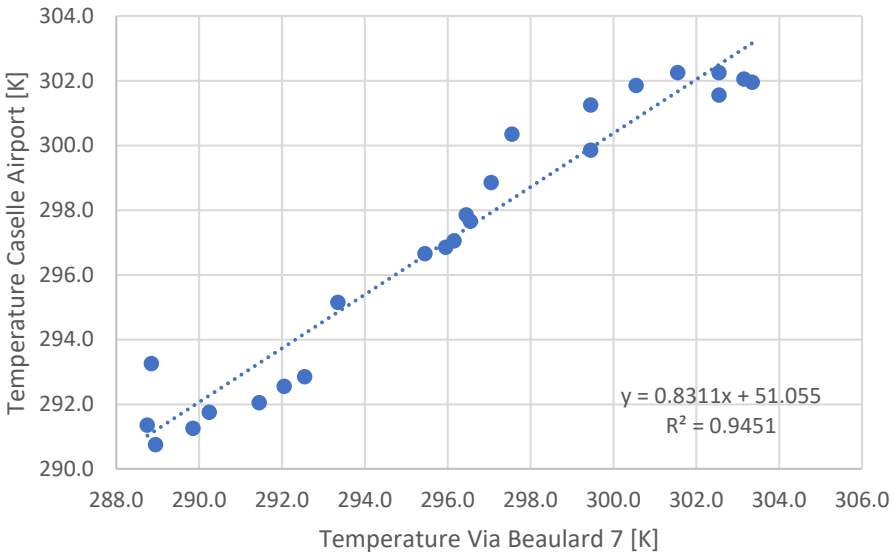


Figura 24. Analisi di correlazione delle temperature dell'aria per il giorno 27/07/2014

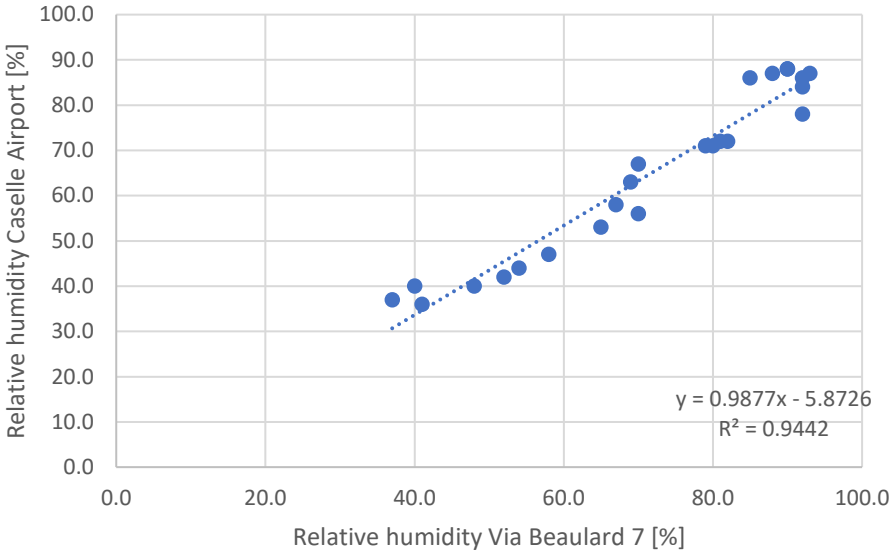


Figura 25. Analisi di correlazione delle umidità relative per il giorno 27/07/2014

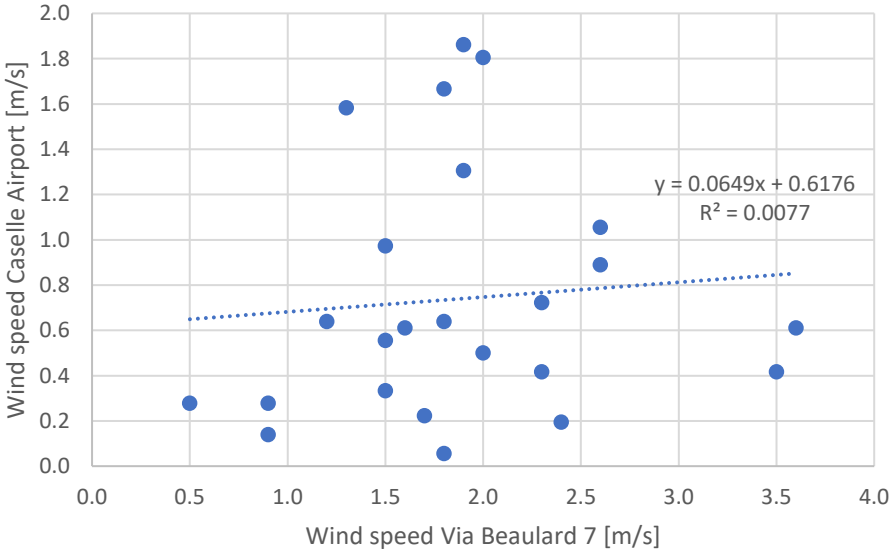


Figura 26. Analisi di correlazione delle velocità del vento per il giorno 27/07/2014

Le analisi relative al coefficiente di determinazione per i parametri meteorologici relativi alle due stazioni sono state condotte anche per il 7 luglio 2015, ovvero la giornata caratterizzata dall'ondata di calore e sono presentate nelle figure da Figura 27 a Figura 29.

In questo caso, le temperature dell'aria rilevate dalle due stazioni meteorologiche mostrano un buon coefficiente di determinazione, pari a 0.80, che, tuttavia, risulta inferiore a quello trovato per le due giornate rappresentative della stagione invernale ed estiva.

I dati relativi all'umidità relativa mostrano un coefficiente più basso di quelli registrati nelle altre due giornate, cioè pari a 0.70. La velocità del vento, come già per le precedenti giornate, mostra un coefficiente di determinazione molto basso, pari a 0.15. Pertanto, per il 7 luglio 2015, questi due parametri non saranno confrontati con gli *output* del modello ENVI-met per determinare l'errore relativo alla simulazione.

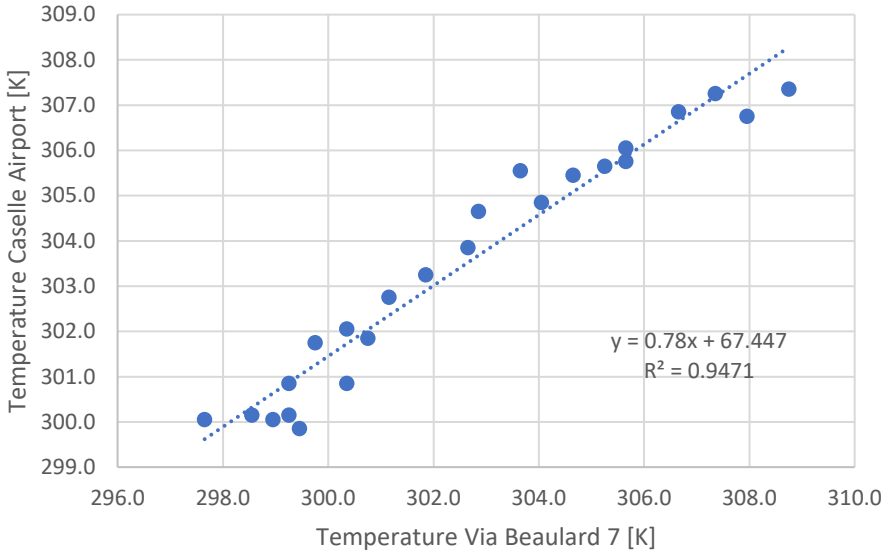


Figura 27. Analisi di correlazione delle temperature dell'aria per il giorno 07/07/2015

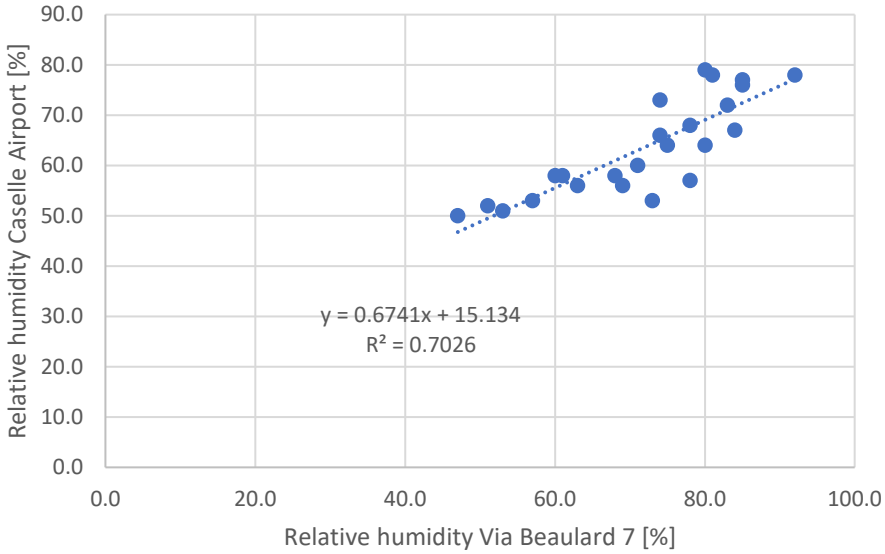


Figura 28. Analisi di correlazione delle umidità relative per il giorno 07/07/2015

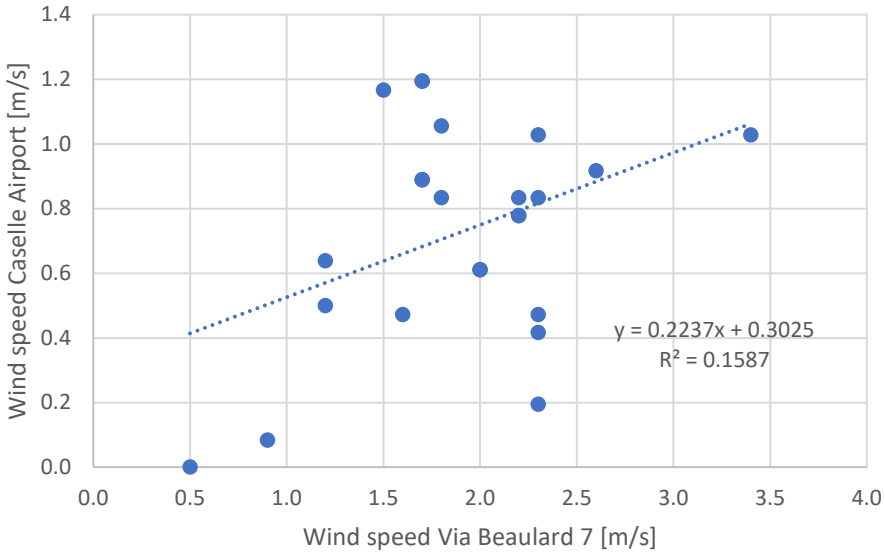


Figura 29. Analisi di correlazione delle velocità del vento per il giorno 07/07/2015

2.3 Isola di calore urbana

È stata calcolata l'UHI relativa all'area urbana selezionata nella città di Torino per le tre giornate tipiche.
Per la giornata tipica invernale (i.e., 19 febbraio 2015) è stata trovata una UHI media di 2.4 °C. Ovvero, è stata trovata una differenza di temperatura dell'aria tra via Beaulard 7 e l'area rurale dell'aeroporto di Caselle Torinese pari a 2.4 °C con picchi in tarda mattinata e in tarda serata, alle ore 11:00 e alle ore 22.00, pari a 3.9 e 4.2 °C, rispettivamente (Figura 30). Invece, nel pomeriggio dalle 14:30 alle 15:30 la differenza di temperatura dell'aria tra via Beaulard 7 e Caselle Aeroporto diventa negativa, risultando che la temperatura dell'aria in via Beaulard 7 è più bassa rispetto a Caselle Aeroporto fino ad un massimo di 0.3 °C (Figura 30). È tuttavia necessario sottolineare che i dati meteorologici sono rilevati dalle due centraline ad altezze diverse. Infatti, la centralina di via Beaulard 7 è posta sul tetto di un edificio ed è posta a circa 20 m dal piano strada, mentre la centralina di Caselle Aeroporto è posizionata a terra e i dati del termometro e dell'igrometro sono registrati ad un'altezza di circa 1.6 m dal suolo, e i dati dell'anemometro sono relativi ad una quota di 10 m dal piano campagna. Questa differenza di altezza potrebbe portare a sottostimare l'UHI.
La Figura 30 mostra, inoltre, la differenza di umidità relativa tra i dati registrati dalla stazione sita in via Beaulard 7 e quella in Caselle Aeroporto. È facile osservare che l'andamento della differenza di umidità ricalca abbastanza bene l'andamento delle differenze di temperatura, seppur con valori opposti. I dati della stazione di Caselle Aeroporto, infatti, mostrano una maggiore umidità relativa dell'aria rispetto a quelli di via Beaulard 7. Risulta che l'umidità relativa registrata a Caselle sia, in media, superiore di 6.7% con punte di circa il 20% alle ore 05.00, 15% alle ore 22.00 e 13% alle ore 07.00 (Figura 14). Tuttavia, alle 02.00 e tra le 14.00 e le 15.30 l'umidità relativa in via Beaulard è superiore rispetto a quella registrata a Caselle Aeroporto (Figura 30).

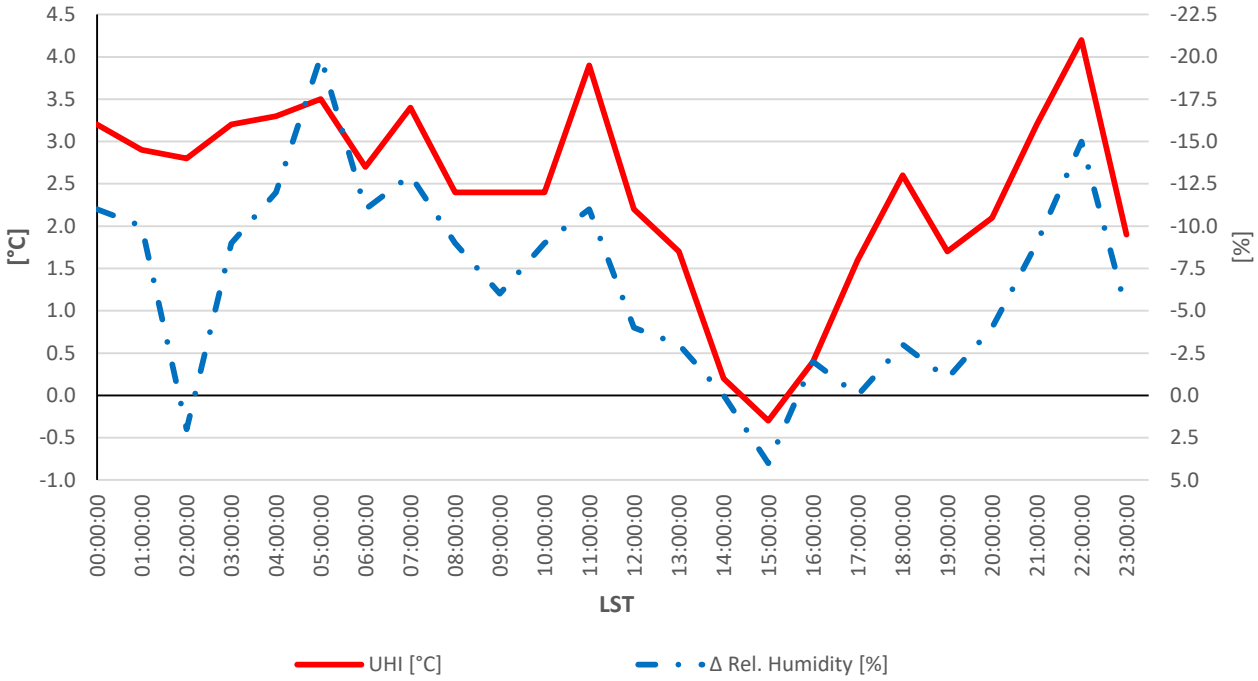


Figura 30. UHI e differenza di umidità relativa per il giorno 19/01/2016

Similmente, è stata investigata la differenza tra la velocità del vento tra le due stazioni. È stato trovato che la velocità del vento a Caselle Aeroporto è maggiore rispetto alla velocità del vento in via Beaulard 7 (Figura 31). In particolare, si è trovato che, in media, la velocità del vento è maggiore di 0.8 m/s a Caselle Aeroporto rispetto a via Beaulard con punte massime di 2.0 m/s alle ore 03.00, di 1.8 m/s alle ore 01.00 e di 1.7 m/s alle ore 06.00; la maggiore ventosità registrata a Caselle Aeroporto è probabilmente dovuta alla mancanza di ostacoli fisici che ne possano ridurre la velocità. La Figura 31 mostra anche che alle ore 00.00, 05.00 e alle ore 09.00 la velocità del vento in via Beaulard è maggiore rispetto a quella in Caselle Aeroporto di 0.2, 0.1 e 0.1 m/s, rispettivamente.

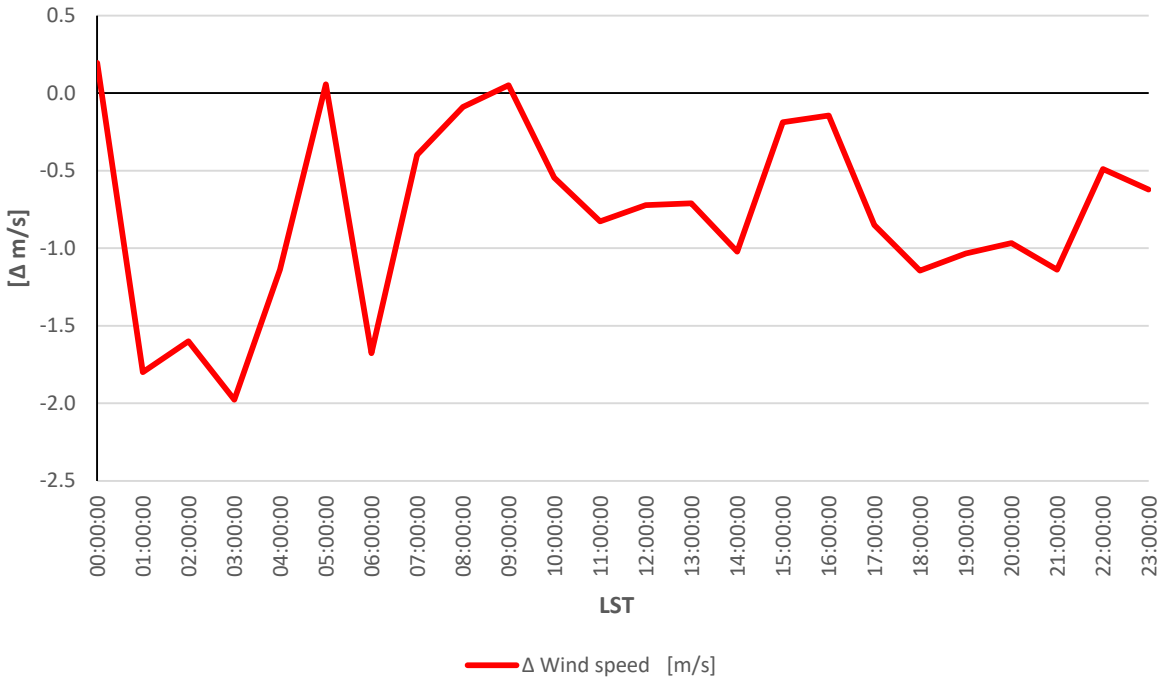


Figura 31. Differenza nella velocità del vento per il giorno 19/01/2016

La Figura 32 mostra che durante una giornata tipica estiva (i.e., 27 luglio 2014) l'UHI di Torino arriva a circa 4 °C. La magnitudo media della UHI è di 1.1 °C, il picco massimo di 4.4 °C viene raggiunto alle 07.00, dopo di che la UHI diminuisce fino ad un minimo di 1.2 °C registrato alle ore 09.00 e poi aumenta fino alle 12.00 quando raggiunge i 2.8 °C, ridiscende fino a divenire negativa tra le 15:30 e le 19.30, con un minimo di -1.4 °C alle 18.00 e risale a 1.1 °C alle 21.00.

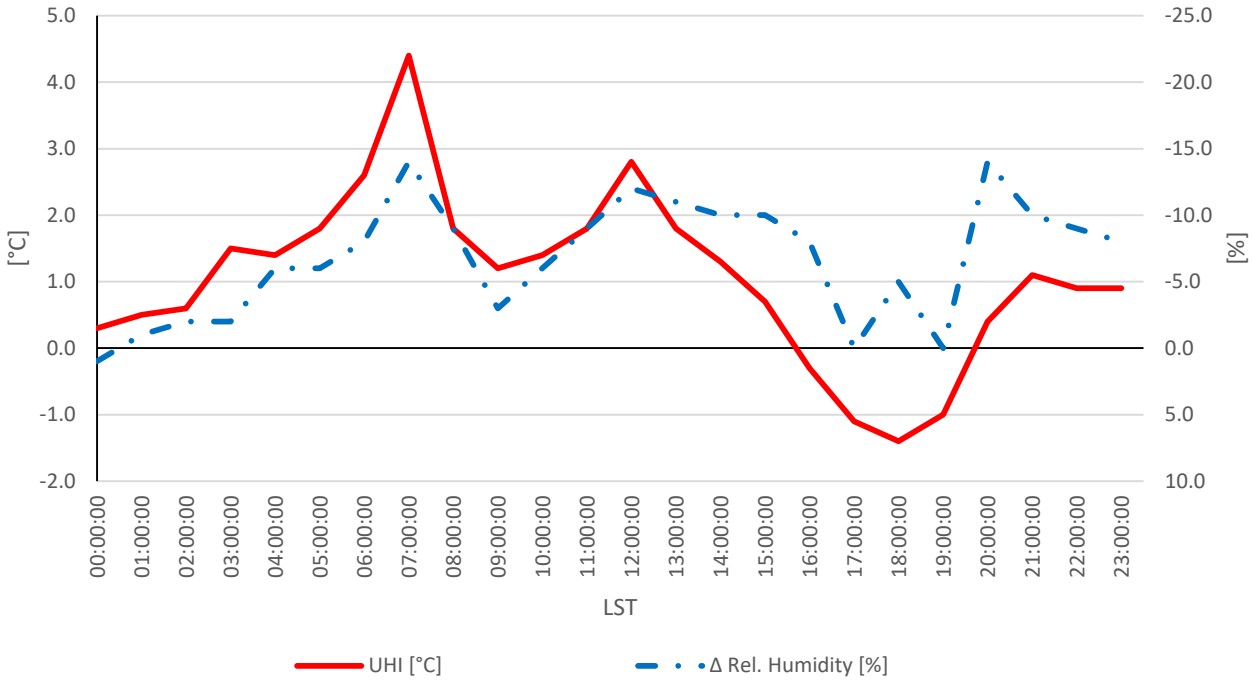


Figura 32. UHI e differenza di umidità relativa per il giorno 27/07/2014

L'umidità relativa rilevata in via Beaulard risulta essere inferiore rispetto a quella rilevata a Caselle Aeroporto, con un andamento che ricalca, seppur a segni invertiti, quello della UHI (Figura 32). In particolare, si è trovato che, in media, Caselle Aeroporto ha un'umidità superiore rispetto a via Beaulard del 6.8% con punte del 14.0% alle ore 7.00 e alle ore 20.00 (Figura 32).
Inoltre, sono state analizzate anche le velocità del vento e si è visto che mediamente la velocità del vento è maggiore a Caselle Aeroporto di 1.1 m/s con punte di 3.1 m/s alle ore 20.00 e di 3.0 m/s alle 22.00 e alle ore 15.30 (Figura 33). Mentre, in via Beaulard la velocità del vento supera quella di Caselle Aeroporto di 0.3 m/s alle 14.00 (Figura 33).

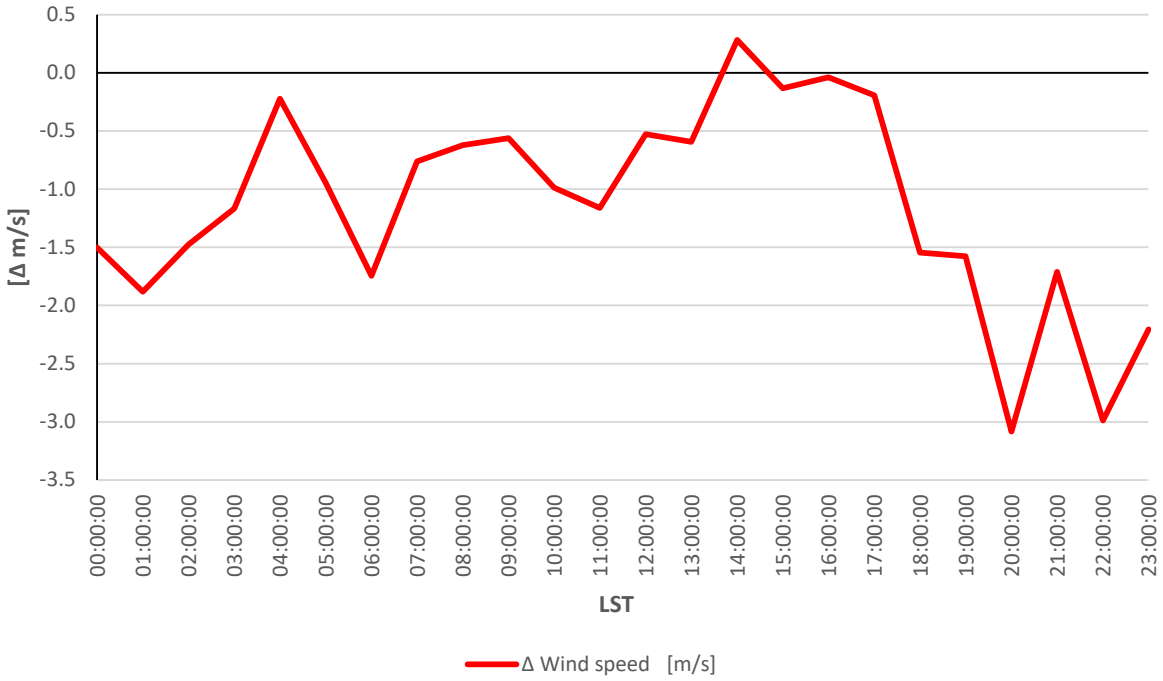


Figura 33. Differenza nella velocità del vento per il giorno 27/07/2014

In modo analogo è stata indagata anche l'UHI durante un'ondata di calore (i.e., 7 luglio 2015) così come la differenza della ventosità rilevata dalle due centraline meteorologiche.

La Figura 34 mostra che l'isola di calore rilevata in via Beaulard 7 ha una magnitudo media di 0.9 °C con picchi di 2.4 °C alle ore 06.00, 2.0 °C alle ore 00.00, 1.9 °C alle ore 11.00 e di 1.6 °C alle ore 22.00; mentre, tra le ore 15.00 e le ore 17.30 la temperatura registrata in via Beaulard è inferiore rispetto a quella registrata a Caselle Aeroporto, con un minimo di -1.4 °C alle 16.00. Confrontando i valori dell'UHI rilevati durante un'ondata di calore (i.e., 7 luglio 2015) con quelli registrati durante una giornata estiva tipica (i.e., 01 luglio 2015) si può notare che la massima magnitudo dell'isola di calore è abbastanza simile (i.e., 1.1 °C per una giornata tipica estiva e 0.9 °C per il 7 luglio 2015). Infatti, risulta che seppure la temperatura media in via Beaulard registrata durante l'ondata di calore sia superiore (i.e., 30.3 °C) di ben 6.4 °C rispetto a quella registrata in un giorno tipico estivo (i.e., 23.9 °C), l'UHI risulta molto simile poiché la temperatura media registrata durante un'ondata di calore a Caselle Aeroporto (i.e., 29.4 °C) è superiore di circa 6.6 °C rispetto ad una giornata tipica estiva (i.e., 22.8 °C).

È possibile notare, inoltre, che in media l'umidità relativa registrata in via Beaulard è inferiore, rispetto a quella registrata a Caselle Aeroporto, dell'8.3%, con un andamento simile a quello della UHI, seppur con i valori opposti. Tuttavia, la Figura 34 mostra anche ore della giornata in cui l'umidità relativa in via Beaulard è superiore, fino a circa 3% (i.e., alle ore 16.00).

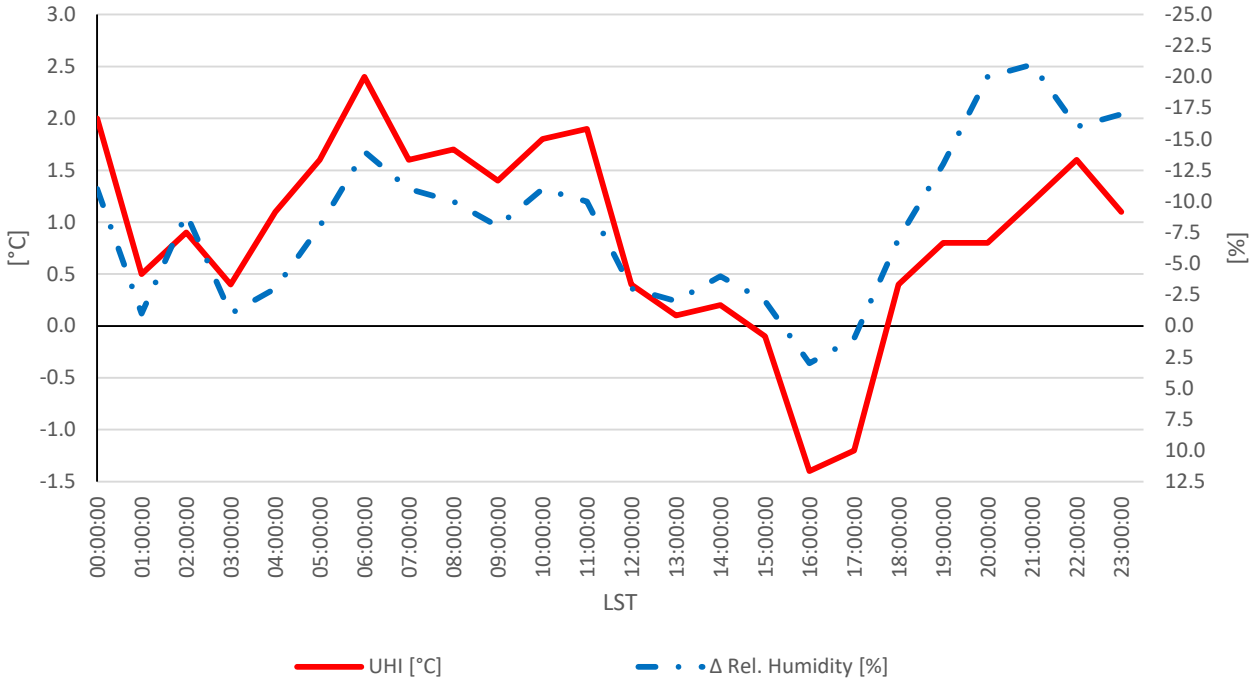


Figura 34. UHI e differenza di umidità relativa per il giorno 07/07/2015

In Figura 35 sono mostrate le differenze tra le velocità del vento registrate in via Beaulard e a Caselle aeroporto.

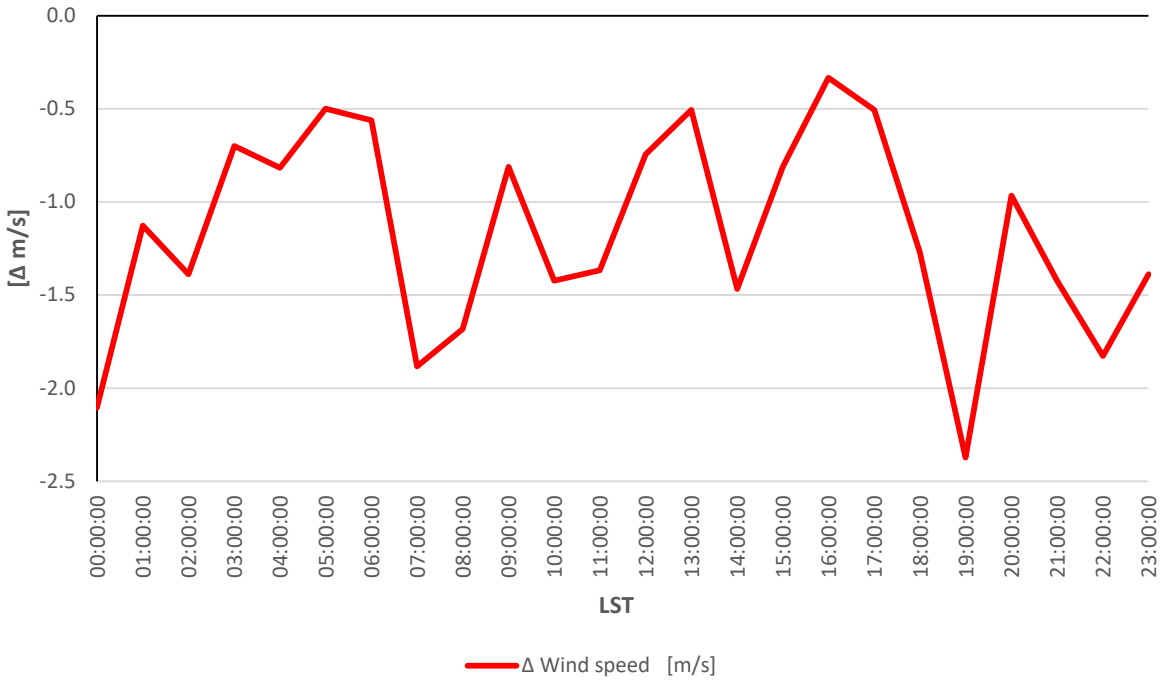


Figura 35. Differenza nella velocità del vento per il giorno 07/07/2015

Dall'analisi dei dati relativi alla ventosità risulta che in media la velocità del vento è di 1.2 m/s inferiore in via Beaulard rispetto a Caselle Aeroporto, con punte di -2.4 m/s alle 19.00, -2.1 m/s alle 00.00 e -1.9 m/s alle 07.00.

3 Isola di calore urbana a Milano

3.1 Stazioni meteorologiche

Al fine di forzare il modello ENVI-met, per le condizioni meteorologiche al contorno del dominio di calcolo, sono stati scaricati i dati relativi alla stazione meteorologica dell'aeroporto di Linate (Figura 36).

La stazione meteorologica di Linate è sita in un'area extraurbana a est di Milano, appena al di fuori della tangenziale est e a circa 8 km in direzione Sud-Est dalla stazione meteorologica di viale Marche 71 (area densamente urbanizzata).

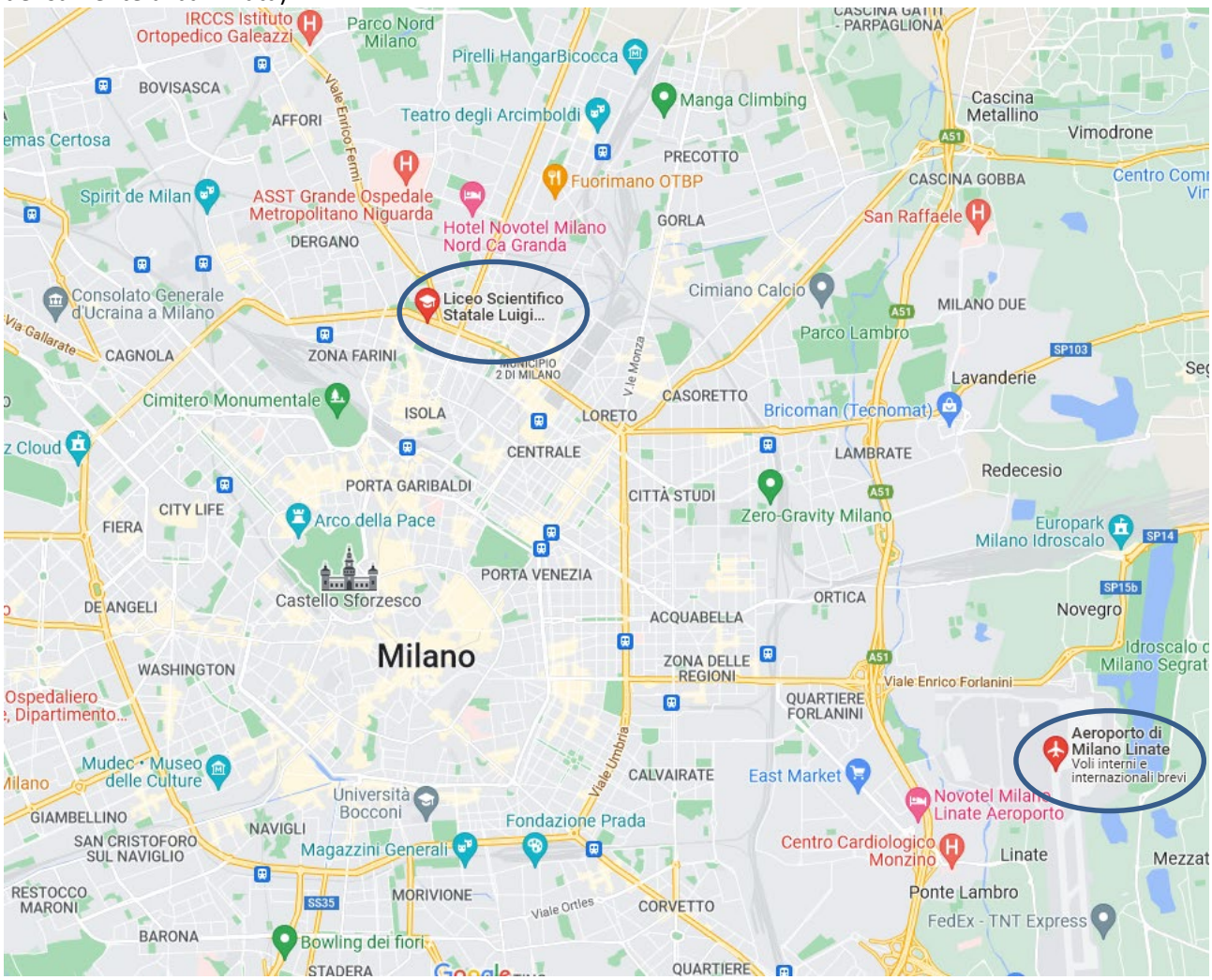


Figura 36. Individuazione delle stazioni meteorologiche di Milano, in viale Marche 71 (Liceo Cremona) e presso l'aeroporto di Linate

I dati meteorologici rilevati dalle due stazioni possono, in ragione della localizzazione di quest'ultime, essere utilizzati per identificare la magnitudo dell'isola di calore di Milano. In particolare, i dati delle due stazioni meteorologiche sono stati utilizzati per identificare l'UHI di una giornata tipica invernale, ovvero il 14 dicembre 2018, tipica di una giornata estiva, ovvero il 19 giugno 2015, e in presenza di un'ondata di calore, con riferimento alla giornata del 7 luglio 2015.

3.2 Dati e coefficienti di determinazione

I dati meteorologici utilizzati per forzare le condizioni al contorno del dominio e per il calcolo delle isole di calore urbane di Milano sono riportati nelle tabelle da Tabella 13 a Tabella 18.

Tabella 13. Dati meteorologici relativi al 14.12.2018 rilevati dalla stazione di Linate

Date [DD.MM.YYYY]	Time [hh:mm:ss]	Abs. Temperature [K]	Rel. Humidity [%]	WindSpeed [m/s]	WindDir [ø]
14.12.2018	00:00:00	276.15	60.0	1.44	180.0
14.12.2018	00:30:00	275.75	59.5	0.72	180.0
14.12.2018	01:00:00	275.35	59.0	0.00	180.0
14.12.2018	01:30:00	274.95	59.5	0.28	180.0
14.12.2018	02:00:00	274.55	60.0	0.56	180.0
14.12.2018	02:30:00	273.95	61.4	0.57	180.0
14.12.2018	03:00:00	273.35	62.8	0.58	180.0
14.12.2018	03:30:00	273.00	63.0	0.82	180.0
14.12.2018	04:00:00	272.65	63.2	1.06	180.0
14.12.2018	04:30:00	272.40	65.3	0.81	180.0
14.12.2018	05:00:00	272.15	67.4	0.56	180.0
14.12.2018	05:30:00	271.65	65.1	0.56	180.0
14.12.2018	06:00:00	271.15	62.9	0.56	180.0
14.12.2018	06:30:00	270.70	63.7	0.57	180.0
14.12.2018	07:00:00	270.25	64.4	0.58	180.0
14.12.2018	07:30:00	270.85	66.1	0.60	180.0
14.12.2018	08:00:00	271.45	67.7	0.61	180.0
14.12.2018	08:30:00	272.65	66.4	1.03	180.0
14.12.2018	09:00:00	273.85	65.1	1.44	180.0
14.12.2018	09:30:00	274.50	63.7	1.28	185.0
14.12.2018	10:00:00	275.15	62.3	1.11	190.0
14.12.2018	10:30:00	275.65	58.2	1.11	195.0
14.12.2018	11:00:00	276.15	54.0	1.11	202.5
14.12.2018	11:30:00	277.05	55.2	1.11	202.5
14.12.2018	12:00:00	277.95	56.4	1.11	202.5
14.12.2018	12:30:00	278.40	53.7	1.11	202.5
14.12.2018	13:00:00	278.85	51.0	1.11	202.5
14.12.2018	13:30:00	279.00	51.7	1.53	202.5
14.12.2018	14:00:00	279.15	52.4	1.94	202.5
14.12.2018	14:30:00	279.40	54.3	2.08	202.5
14.12.2018	15:00:00	279.65	56.1	2.22	202.5
14.12.2018	15:30:00	278.90	58.2	2.19	202.5
14.12.2018	16:00:00	278.15	60.2	2.17	195.0
14.12.2018	16:30:00	277.40	67.5	1.78	190.0
14.12.2018	17:00:00	276.65	74.7	1.39	180.0
14.12.2018	17:30:00	276.25	77.5	1.22	180.0
14.12.2018	18:00:00	275.85	80.3	1.06	165.0
14.12.2018	18:30:00	275.00	82.2	1.08	150.0
14.12.2018	19:00:00	274.15	84.0	1.11	135.0
14.12.2018	19:30:00	273.90	85.1	1.11	115.0
14.12.2018	20:00:00	273.65	86.2	1.11	115.0
14.12.2018	20:30:00	273.40	87.3	0.90	125.0
14.12.2018	21:00:00	273.15	88.4	0.69	135.0
14.12.2018	21:30:00	273.05	90.6	0.76	135.0
14.12.2018	22:00:00	272.95	92.8	0.83	135.0

14.12.2018	22:30:00	272.25	92.8	0.83	145.0
14.12.2018	23:00:00	271.55	92.8	0.83	160.0
14.12.2018	23:30:00	270.85	46.4	0.93	170.0
14.12.2018	00:00:00	270.15	98.0	1.02	180.0

Tabella 14. Dati meteorologici relativi allo 19.06.2015 rilevati dalla stazione di Linate

Date [DD.MM.YYYY]	Time [hh:mm:ss]	Abs. Temperature [K]	Rel. Humidity [%]	WindSpeed [m/s]	WindDir [°]
19.06.2015	00:00:00	291.15	69.00	1.53	247.50
19.06.2015	00:30:00	290.65	65.50	2.04	247.50
19.06.2015	01:00:00	290.15	62.00	2.55	247.50
19.06.2015	01:30:00	289.65	65.50	1.79	270.00
19.06.2015	02:00:00	289.15	69.00	1.02	292.50
19.06.2015	02:30:00	289.65	67.00	1.28	315.00
19.06.2015	03:00:00	290.15	65.00	1.53	337.50
19.06.2015	03:30:00	289.65	71.50	1.28	310.50
19.06.2015	04:00:00	289.15	78.00	1.02	283.50
19.06.2015	04:30:00	289.15	75.50	0.77	256.50
19.06.2015	05:00:00	289.15	73.00	0.51	229.50
19.06.2015	05:30:00	289.15	78.00	0.77	202.50
19.06.2015	06:00:00	289.15	83.00	1.02	175.50
19.06.2015	06:30:00	289.65	72.00	1.02	148.50
19.06.2015	07:00:00	290.15	61.00	1.02	121.50
19.06.2015	07:30:00	290.15	63.00	1.28	94.50
19.06.2015	08:00:00	290.15	65.00	1.53	67.50
19.06.2015	08:30:00	290.65	65.00	2.04	78.75
19.06.2015	09:00:00	291.15	65.00	2.55	90.00
19.06.2015	09:30:00	291.15	61.50	2.04	90.00
19.06.2015	10:00:00	291.15	58.00	1.53	90.00
19.06.2015	10:30:00	292.65	53.00	1.53	90.00
19.06.2015	11:00:00	294.15	48.00	1.53	90.00
19.06.2015	11:30:00	294.65	47.00	1.53	118.13
19.06.2015	12:00:00	295.15	46.00	1.53	146.25
19.06.2015	12:30:00	295.15	46.00	1.53	174.38
19.06.2015	13:00:00	295.15	46.00	1.53	202.50
19.06.2015	13:30:00	295.65	45.00	2.04	202.50
19.06.2015	14:00:00	296.15	44.00	2.55	202.50
19.06.2015	14:30:00	296.65	45.50	2.55	225.00
19.06.2015	15:00:00	297.15	47.00	2.55	247.50
19.06.2015	15:30:00	297.15	47.00	2.55	236.25
19.06.2015	16:00:00	297.15	47.00	2.55	225.00
19.06.2015	16:30:00	297.65	47.00	2.81	225.00
19.06.2015	17:00:00	298.15	47.00	3.06	225.00
19.06.2015	17:30:00	298.15	48.00	2.55	225.00
19.06.2015	18:00:00	298.15	49.00	2.04	225.00
19.06.2015	18:30:00	298.15	49.00	2.04	236.25
19.06.2015	19:00:00	298.15	49.00	2.04	247.50
19.06.2015	19:30:00	298.15	52.00	1.79	236.25

19.06.2015	20:00:00	298.15	55.00	1.53	225.00
19.06.2015	20:30:00	297.65	60.50	1.28	225.00
19.06.2015	21:00:00	297.15	66.00	1.02	225.00
19.06.2015	21:30:00	295.65	66.00	1.02	202.50
19.06.2015	22:00:00	294.15	66.00	1.02	180.00
19.06.2015	22:30:00	293.65	62.00	1.53	213.75
19.06.2015	23:00:00	293.15	58.00	2.04	247.50
19.06.2015	23:30:00	281.65	56.50	2.04	168.75
20.06.2015	00:00:00	270.15	55.00	2.04	90.00

Tabella 15. Dati meteorologici relativi al 07.07.2015 rilevati dalla stazione di Linate

Date [DD.MM.YYYY]	Time [hh:mm:ss]	Abs. Temperature [K]	Rel. Humidity [%]	WindSpeed [m/s]	WindDir [°]
07.07.2015	00:00:00	301.15	69.00	1.53	247.50
07.07.2015	00:30:00	301.65	65.50	2.04	247.50
07.07.2015	01:00:00	302.15	62.00	2.55	247.50
07.07.2015	01:30:00	301.65	65.50	1.79	270.00
07.07.2015	02:00:00	301.15	69.00	1.02	292.50
07.07.2015	02:30:00	301.15	67.00	1.28	315.00
07.07.2015	03:00:00	301.15	65.00	1.53	337.50
07.07.2015	03:30:00	299.65	71.50	1.28	310.50
07.07.2015	04:00:00	298.15	78.00	1.02	283.50
07.07.2015	04:30:00	298.15	75.50	0.77	256.50
07.07.2015	05:00:00	298.15	73.00	0.51	229.50
07.07.2015	05:30:00	297.65	78.00	0.77	202.50
07.07.2015	06:00:00	297.15	83.00	1.02	175.50
07.07.2015	06:30:00	298.15	72.00	1.02	148.50
07.07.2015	07:00:00	299.15	61.00	1.02	121.50
07.07.2015	07:30:00	299.15	63.00	1.28	94.50
07.07.2015	08:00:00	299.15	65.00	1.53	67.50
07.07.2015	08:30:00	299.65	65.00	2.04	78.75
07.07.2015	09:00:00	300.15	65.00	2.55	90.00
07.07.2015	09:30:00	301.15	61.50	2.04	90.00
07.07.2015	10:00:00	302.15	58.00	1.53	90.00
07.07.2015	10:30:00	303.15	53.00	1.53	90.00
07.07.2015	11:00:00	304.15	48.00	1.53	90.00
07.07.2015	11:30:00	304.65	47.00	1.53	118.13
07.07.2015	12:00:00	305.15	46.00	1.53	146.25
07.07.2015	12:30:00	305.65	46.00	1.53	174.38
07.07.2015	13:00:00	306.15	46.00	1.53	202.50
07.07.2015	13:30:00	307.15	45.00	2.04	202.50
07.07.2015	14:00:00	308.15	44.00	2.55	202.50
07.07.2015	14:30:00	308.15	45.50	2.55	225.00
07.07.2015	15:00:00	308.15	47.00	2.55	247.50
07.07.2015	15:30:00	308.15	47.00	2.55	236.25
07.07.2015	16:00:00	308.15	47.00	2.55	225.00
07.07.2015	16:30:00	308.15	47.00	2.81	225.00
07.07.2015	17:00:00	308.15	47.00	3.06	225.00

07.07.2015	17:30:00	307.65	48.00	2.55	225.00
07.07.2015	18:00:00	307.15	49.00	2.04	225.00
07.07.2015	18:30:00	307.15	49.00	2.04	236.25
07.07.2015	19:00:00	307.15	49.00	2.04	247.50
07.07.2015	19:30:00	306.15	52.00	1.79	236.25
07.07.2015	20:00:00	305.15	55.00	1.53	225.00
07.07.2015	20:30:00	304.15	60.50	1.28	225.00
07.07.2015	21:00:00	303.15	66.00	1.02	225.00
07.07.2015	21:30:00	303.15	66.00	1.02	202.50
07.07.2015	22:00:00	303.15	66.00	1.02	180.00
07.07.2015	22:30:00	303.15	62.00	1.53	213.75
07.07.2015	23:00:00	303.15	58.00	2.04	247.50
07.07.2015	23:30:00	303.15	56.50	2.04	168.75
07.07.2015	00:00:00	303.15	55.00	2.04	90.00

Tabella 16. Dati meteorologici relativi al 14.12.2018 rilevati dalla stazione di viale Marche 71

Date [DD.MM.YYYY]	Time [hh:mm:ss]	Abs. Temperature [K]	Rel. Humidity [%]	WindSpeed [m/s]	WindDir [°]
14.12.2018	00:00:00	276.8	60.5	0.7	273
14.12.2018	01:00:00	276.6	60.8	0.7	198
14.12.2018	02:00:00	276.1	63.5	0.5	98
14.12.2018	03:00:00	275.7	65.5	0.5	163
14.12.2018	04:00:00	275.3	68.3	0.7	54
14.12.2018	05:00:00	275.2	68.6	0.8	78
14.12.2018	06:00:00	274.9	69	0.7	30
14.12.2018	07:00:00	275.1	68.6	0.7	89
14.12.2018	08:00:00	275.1	70.9	0.7	94
14.12.2018	09:00:00	275.4	68.8	1.3	248
14.12.2018	10:00:00	276.1	64	1.1	282
14.12.2018	11:00:00	276.8	59.9	0.9	271
14.12.2018	12:00:00	277.7	55.5	0.6	293
14.12.2018	13:00:00	278.9	50.3	0.7	259
14.12.2018	14:00:00	279.3	41.1	1.4	199
14.12.2018	15:00:00	278.3	45.1	1.5	265
14.12.2018	16:00:00	277.8	48.5	1.1	223
14.12.2018	17:00:00	277.4	51.2	0.6	219
14.12.2018	18:00:00	277.1	52.1	0.3	168
14.12.2018	19:00:00	276.7	55.4	0.7	117
14.12.2018	20:00:00	276.6	58.9	0.7	103
14.12.2018	21:00:00	276.1	60.2	0.8	48
14.12.2018	22:00:00	275.2	63.5	0.8	39
14.12.2018	23:00:00	274.8	65.4	0.8	76

Tabella 17. Dati meteorologici relativi al 19.06.2015 rilevati dalla stazione di viale Marche 71

Date [DD.MM.YYYY]	Time [hh:mm:ss]	Abs. Temperature [K]	Rel. Humidity [%]	WindSpeed [m/s]	WindDir [ø]
19.06.2015	00:00:00	294.15	57	1.7	97
19.06.2015	01:00:00	293.45	60.7	1.5	65
19.06.2015	02:00:00	292.95	63.6	1	55

19.06.2015	03:00:00	292.55	67.1	1	48
19.06.2015	04:00:00	292.35	69.8	1.1	49
19.06.2015	05:00:00	292.15	72.2	1	53
19.06.2015	06:00:00	292.15	73.7	1.1	58
19.06.2015	07:00:00	293.45	67.5	1.9	65
19.06.2015	08:00:00	295.55	52.9	2.5	82
19.06.2015	09:00:00	295.45	48	2.9	88
19.06.2015	10:00:00	295.55	50.1	2.2	100
19.06.2015	11:00:00	296.35	46.6	2.1	94
19.06.2015	12:00:00	297.55	43.8	1.8	129
19.06.2015	13:00:00	298.65	39	1.9	121
19.06.2015	14:00:00	298.35	39.5	1.7	113
19.06.2015	15:00:00	298.95	39.8	1.5	153
19.06.2015	16:00:00	298.85	39.3	1.7	126
19.06.2015	17:00:00	299.05	39.5	1.4	126
19.06.2015	18:00:00	298.95	39.2	1.3	199
19.06.2015	19:00:00	298.85	40	1.4	225
19.06.2015	20:00:00	298.35	41.8	1.3	235
19.06.2015	21:00:00	297.65	44.3	1.1	242
19.06.2015	22:00:00	296.75	48.2	0.9	188
19.06.2015	23:00:00	296.25	51	1	154

Tabella 18. Dati meteorologici relativi al 07.07.2015 rilevati dalla stazione di viale Marche 71

Date [DD.MM.YYYY]	Time [hh:mm:ss]	Abs. Temperature [K]	Rel. Humidity [%]	WindSpeed [m/s]	WindDir [°]
07.07.2015	00:00:00	303.85	44.7	1.3	218
07.07.2015	01:00:00	302.45	51.8	1.3	299
07.07.2015	02:00:00	301.35	54	0.8	293
07.07.2015	03:00:00	300.85	50.5	1	273
07.07.2015	04:00:00	300.15	48.1	1.2	296
07.07.2015	05:00:00	299.45	48.1	0.5	331
07.07.2015	06:00:00	299.75	48.3	0.9	48
07.07.2015	07:00:00	300.15	47.9	1.7	58
07.07.2015	08:00:00	301.45	47.6	1.8	64
07.07.2015	09:00:00	303.35	41.7	1.6	74
07.07.2015	10:00:00	303.95	36.9	0.9	106
07.07.2015	11:00:00	305.45	33.5	0.9	145
07.07.2015	12:00:00	307.05	33.3	1.2	211
07.07.2015	13:00:00	307.75	33.1	1.4	185
07.07.2015	14:00:00	308.15	34.5	1.8	237
07.07.2015	15:00:00	308.55	33.9	1.6	237
07.07.2015	16:00:00	308.55	33.8	2	240
07.07.2015	17:00:00	308.25	34.4	2.1	244
07.07.2015	18:00:00	307.6	37.5	1.8	239
07.07.2015	19:00:00	306.95	37.2	1.7	229
07.07.2015	20:00:00	306.45	39	1.8	227
07.07.2015	21:00:00	305.85	40.7	0.8	237
07.07.2015	22:00:00	305.35	43	0.4	222

07.07.2015	23:00:00	304.85	43.6	1	224

Per ciascuna delle tre date in cui è stata analizzata l'UHI, sono state studiate le correlazioni tra i parametri usati come forzanti nel modello ENVI-met; in virtù del fatto che non sono stati utilizzate come parametri forzanti del modello ENVI-met né la radiazione solare né la copertura nuvolosa, tali analisi sono state omesse. In Figura 237-39 sono riportate le analisi di correlazione tra i parametri meteorologici rilevati dalle due centraline durante il 14 dicembre 2018. In particolare, in tali figure, viene mostrato il coefficiente di determinazione per le variabili analizzate e l'equazione di regressione. È possibile notare che le temperature registrate in viale Marche sono predette in modo poco efficace dalle temperature registrate all'aeroporto di Linate in quanto il coefficiente di correlazione è pari a circa 0.9.

Per quanto concerne l'umidità relativa registrata all'aeroporto di Linate è poco correlabile all'umidità di viale Marche (il coefficiente di correlazione è prossimo a 0.04). Anche la velocità del vento del vento presenta un coefficiente di determinazione pari a 0.4. Dato il basso valore del coefficiente R^2 relativo all'umidità e alla velocità, questo parametro non sarà confrontati in futuro con quello derivante dalla modellazione ENVI-met nel calcolo dell'errore.

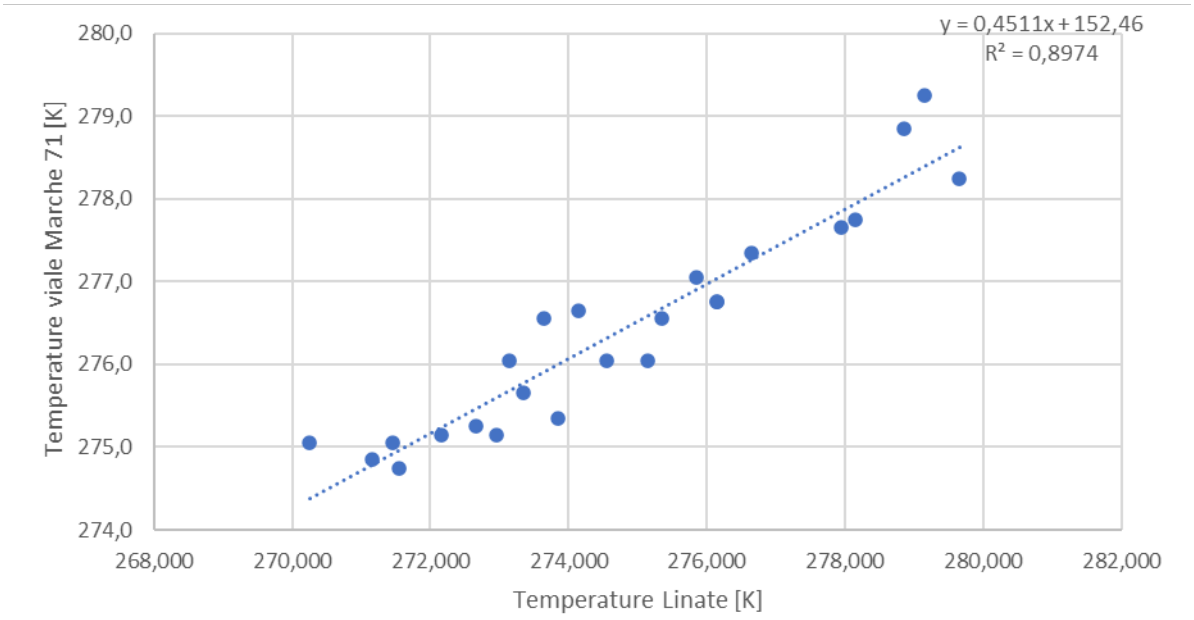


Figura 37. Analisi di correlazione delle temperature dell'aria per il giorno 14/12/2018

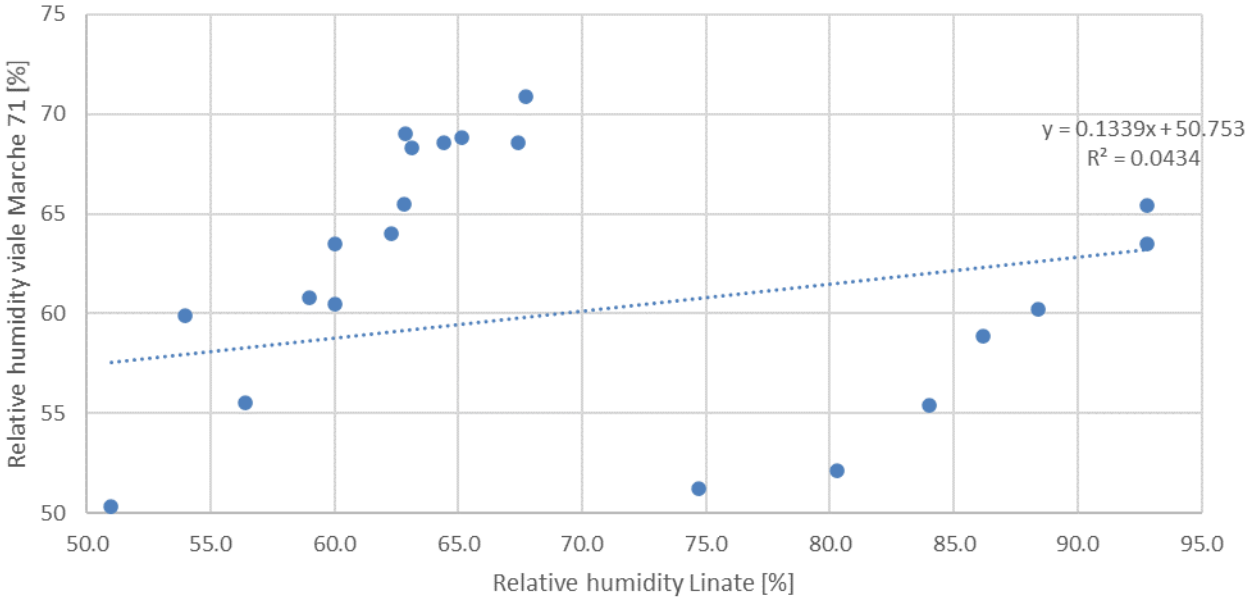


Figura 38. Analisi di correlazione delle umidità relative per il giorno 14/12/2018

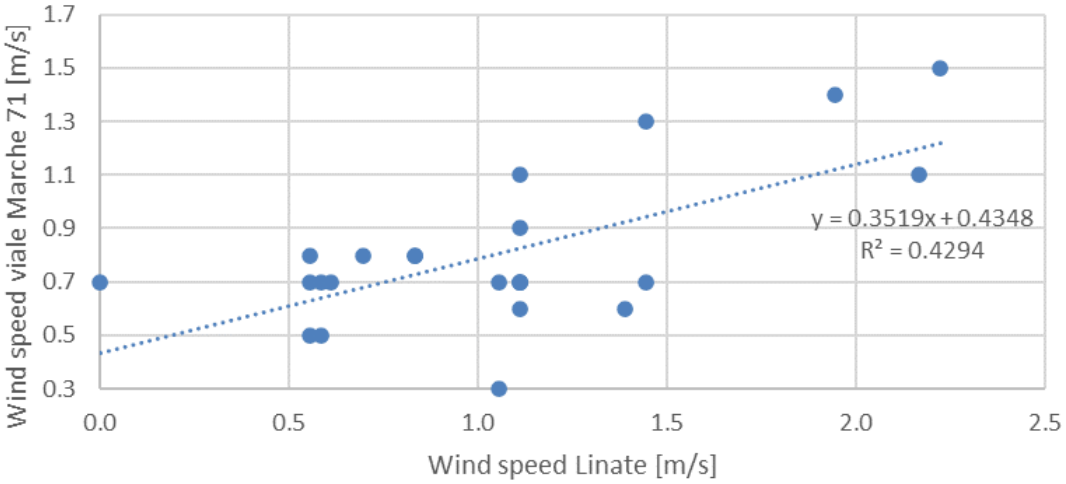


Figura 39. Analisi di correlazione delle velocità del vento per il giorno 14/12/2018

Nelle figure 40-42 sono state riportate le analisi effettuate sui parametri meteorologici rilevati dalle due stazioni nel giorno 19 giugno 2015. È possibile notare che le temperature e i valori di umidità relativa registrati a viale Marche possono essere predetti da quelli rilevati presso l'aeroporto di Linate in maniera decisamente più efficace rispetto alla giornata invernale, con coefficienti di determinazione pari a 0.62 e 0.64 per ciascuna delle grandezze.
La velocità del vento, invece, mostra un coefficiente di determinazione molto basso, pari a 0.017. Anche in questo caso, gli *output* della modellazione ENVI-met verranno confrontati con i soli valori di temperatura dell'aria e di umidità relativa per determinare l'errore e non con quelli della velocità del vento.

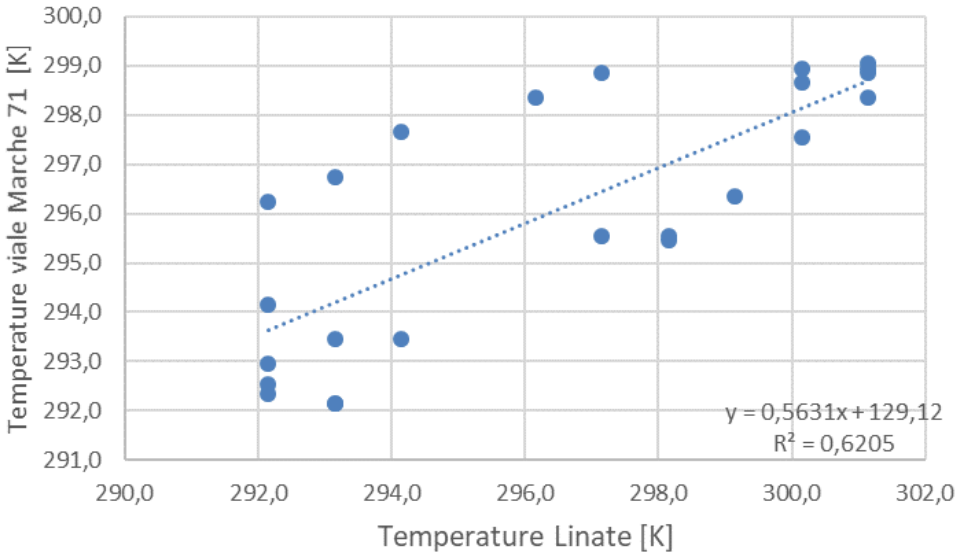


Figura 40. Analisi di correlazione delle temperature dell'aria per il giorno 19/06/2015

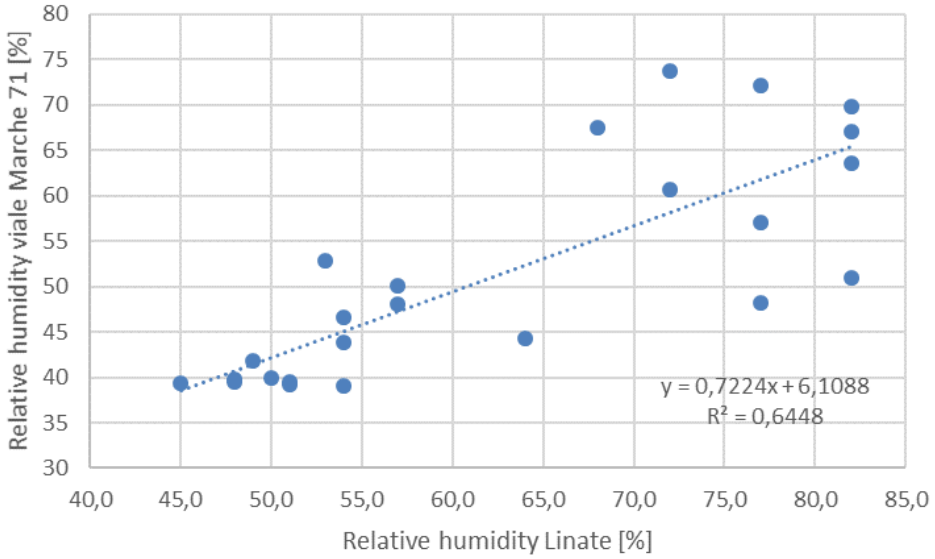


Figura 41. Analisi di correlazione delle umidità relative per il giorno 19/06/2015

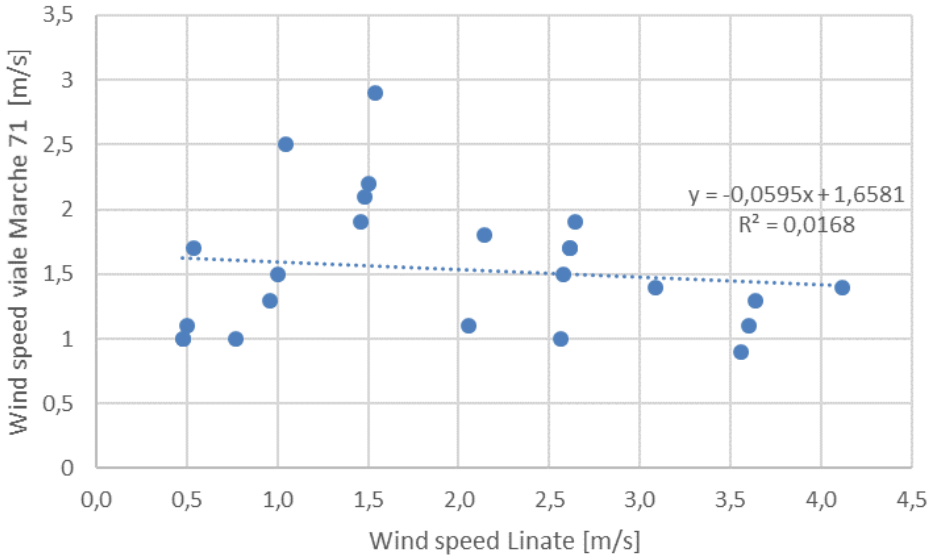


Figura 42. Analisi di correlazione delle velocità del vento per il giorno 19/06/2015

Le analisi relative al coefficiente di determinazione per i parametri meteorologici relativi alle due stazioni sono state condotte anche per il 7 luglio 2015, ovvero la giornata caratterizzata dall'ondata di calore e sono presentate nelle figure 43-45.
In questo caso, le temperature dell'aria rilevate dalle due stazioni meteorologiche mostrano un coefficiente di determinazione, pari a 0.9, che risulta superiore a quello trovato per le due giornate rappresentative della stagione invernale ed estiva.
I dati relativi all'umidità relativa mostrano un coefficiente più basso di quello registrato nella giornata estiva ma più alto della giornata invernale, cioè pari a 0.41. La velocità del vento, come già per le precedenti giornate, mostra un coefficiente di determinazione molto basso, pari a 0. 004. Pertanto, per il 7 luglio 2015, questi due parametri non saranno confrontati con gli *output* del modello ENVI-met per determinare l'errore relativo alla simulazione.

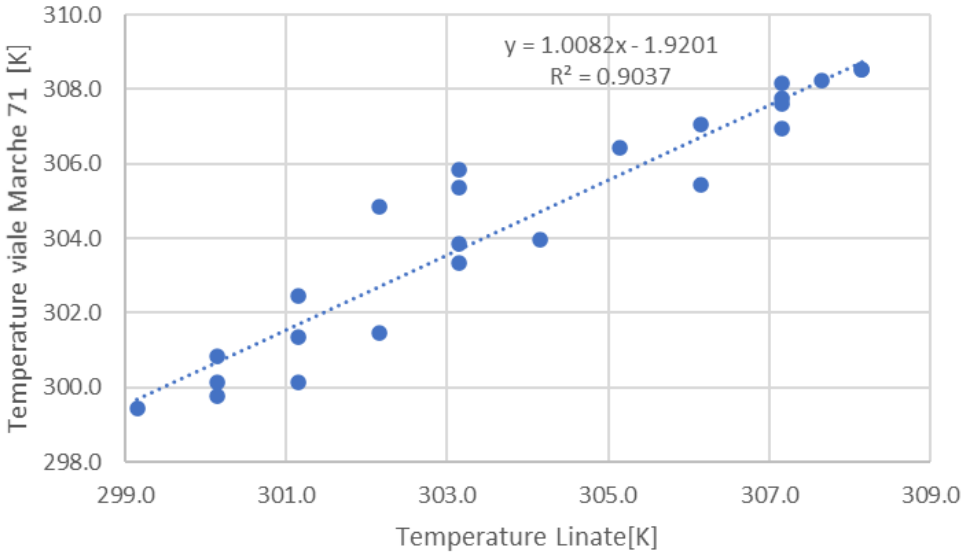


Figura 43. Analisi di correlazione delle temperature dell'aria per il giorno 07/07/2015

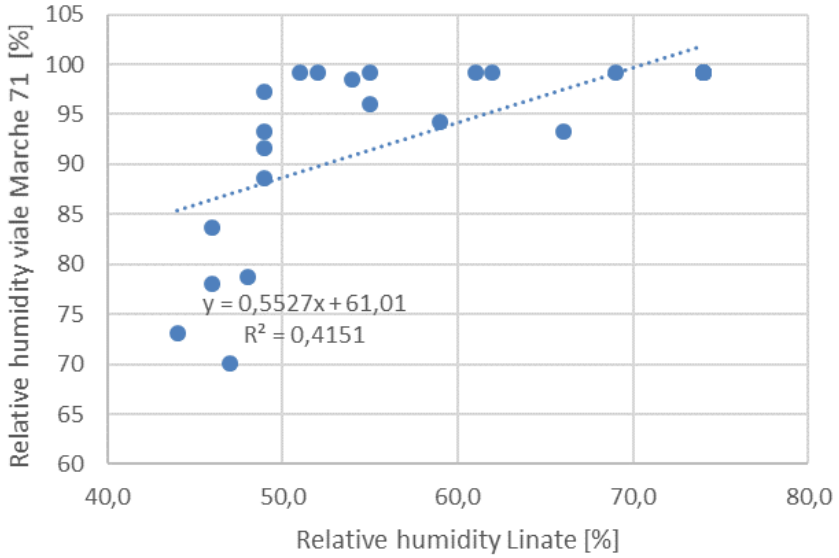


Figura 44. Analisi di correlazione delle umidità relative per il giorno 07/07/2015

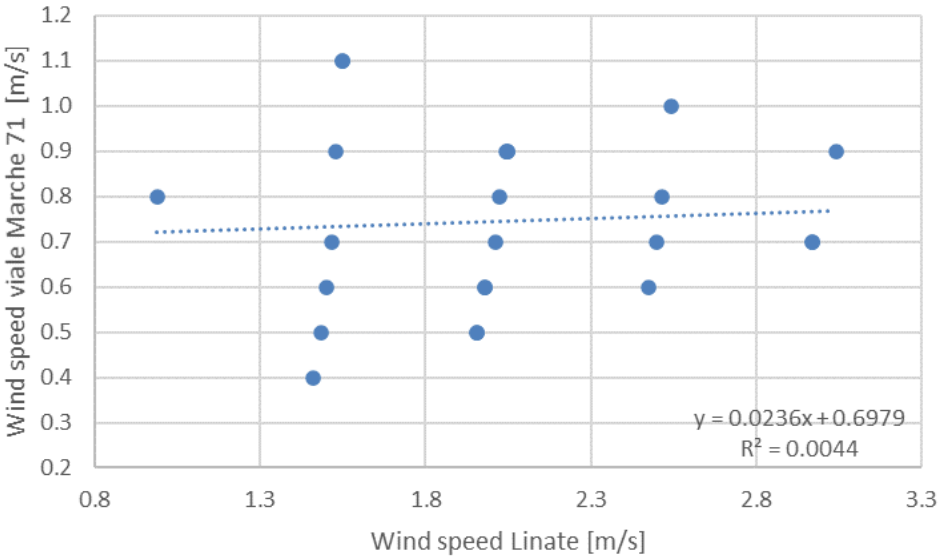


Figura 45. Analisi di correlazione delle velocità del vento per il giorno 07/07/2015

3.3 *Isola di calore urbana*

È stata calcolata l'UHI relativa all'area urbana selezionata nella città di Milano per le tre giornate tipiche.
Per la giornata tipica invernale (i.e., 14 dicembre 2018) è stata trovata una UHI media di 1.9 °C. Ovvero, è stata trovata una differenza di temperatura dell'aria tra viale Marche 71 e l'area rurale dell'aeroporto di Linate con un picco che tra le 4.00 e le 8.00 oscilla tra 3 °C e 4.9 °C e ulteriori due picchi notturni a 3.4 °C e 3.6 °C rispettivamente alle 20.00 e alle 23.00, pari a 0 °C alle 13.00 mentre con picco negativo alle 15.00 pari a -0.9°C (Figura 30).
La Figura 30 mostra, inoltre, la differenza di umidità relativa tra i dati registrati dalla stazione sita in viale Marche 71 e quella a Linate. Risulta che l'umidità relativa registrata a viale Marche 71 sia inferiore a quella registrata a Linate soltanto dalle 12.00 in poi, ma, nonostante ciò, nella media giornaliera è inferiore del 7.9%, questo perché nel momento di picco negativo la differenza supera il -29% mentre il picco positivo si limita ad un +6%.

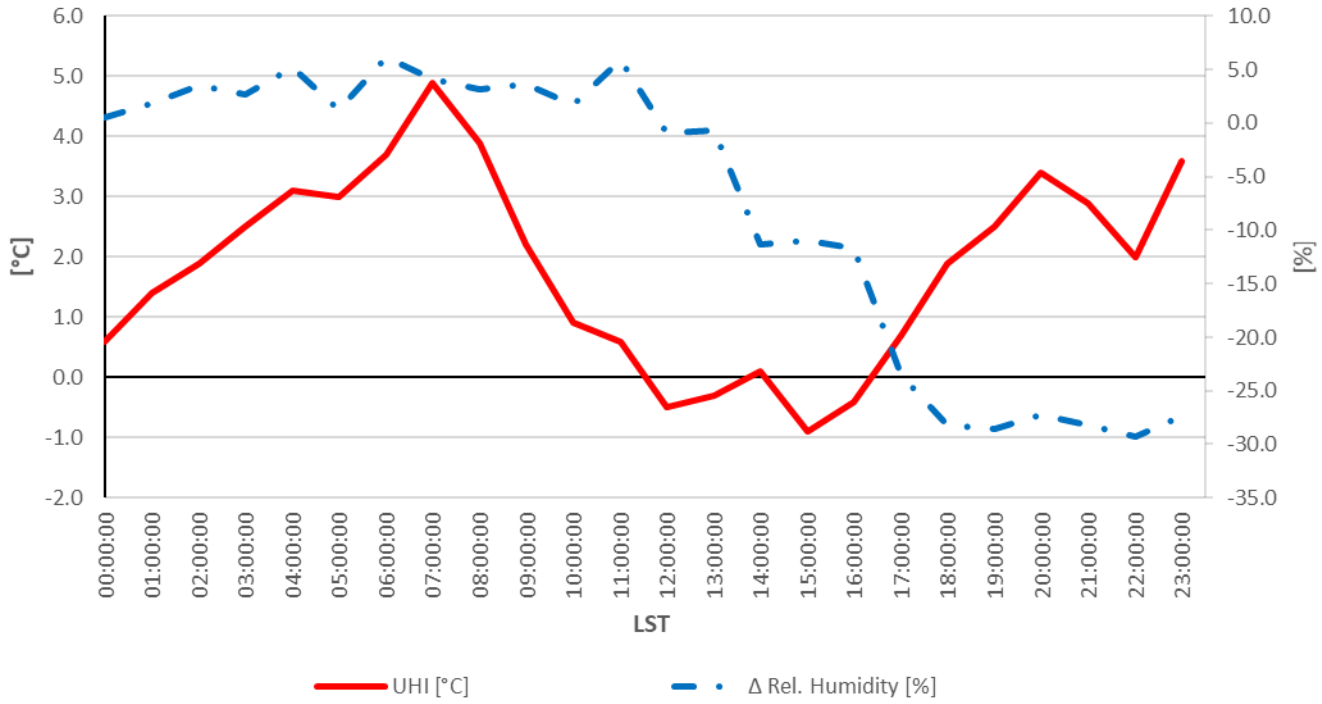


Figura 46. UHI e differenza di umidità relativa per il giorno 14/12/2018

Similmente, è stata investigata la differenza tra la velocità del vento tra le due stazioni. È stato trovato che la velocità del vento a Linate è maggiore rispetto alla velocità del vento in viale Marche 71 (Figura 31). In particolare, si è trovato che, in media, la velocità del vento è maggiore di 0.2 m/s a Linate rispetto a viale Marche 71 con punte massime di 1.1 m/s alle ore 16.00, di 0.7 m/s alle ore 00.00 e di 0.4m/s alle 04.00; la maggiore ventosità registrata a Linate è probabilmente dovuta alla mancanza di ostacoli fisici che ne possano ridurre la velocità.

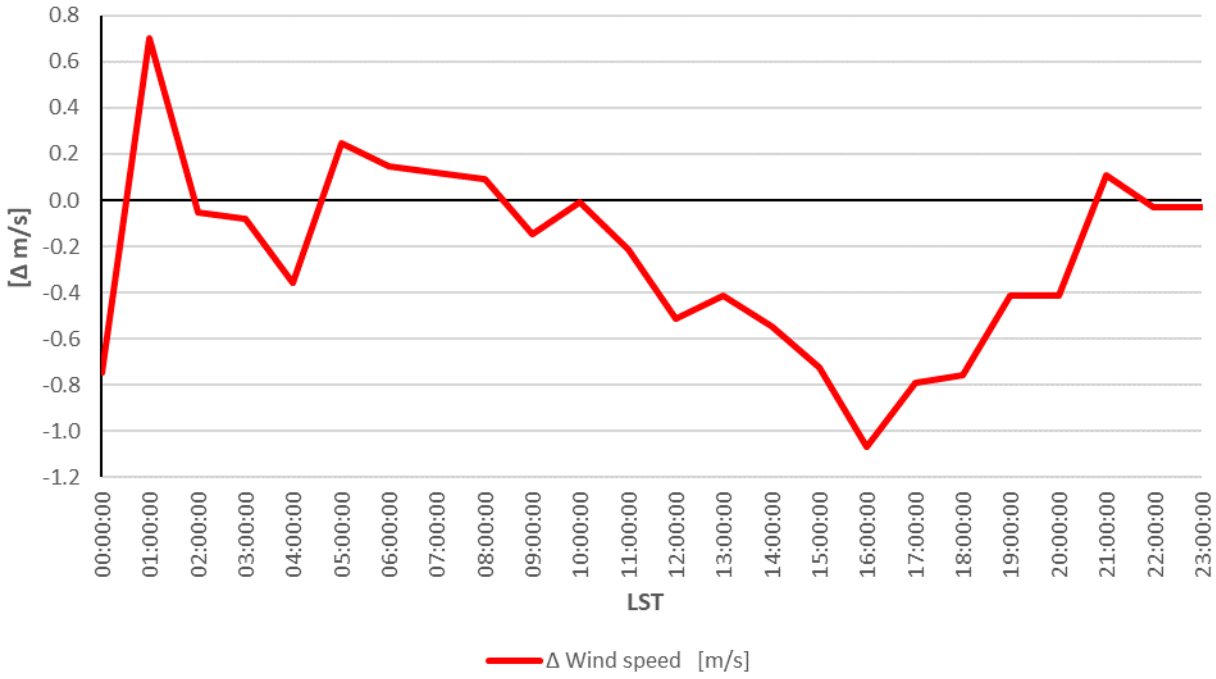


Figura 47. Differenza nella velocità del vento per il giorno 14/12/2018

La Figura 32 mostra che durante una giornata tipica estiva (i.e., 19 giugno 2015) l'UHI di Milano arriva a circa 7 °C. La magnitudo media della UHI è di 2.7 °C, il picco massimo di 7.1 °C viene raggiunto alle 23.00, dopo di che la UHI diminuisce fino ad un minimo di 0.2 °C registrato alle ore 11.00 e poi alle 14.00 con un piccolo picco ad 1.5 °C alle 13.00.

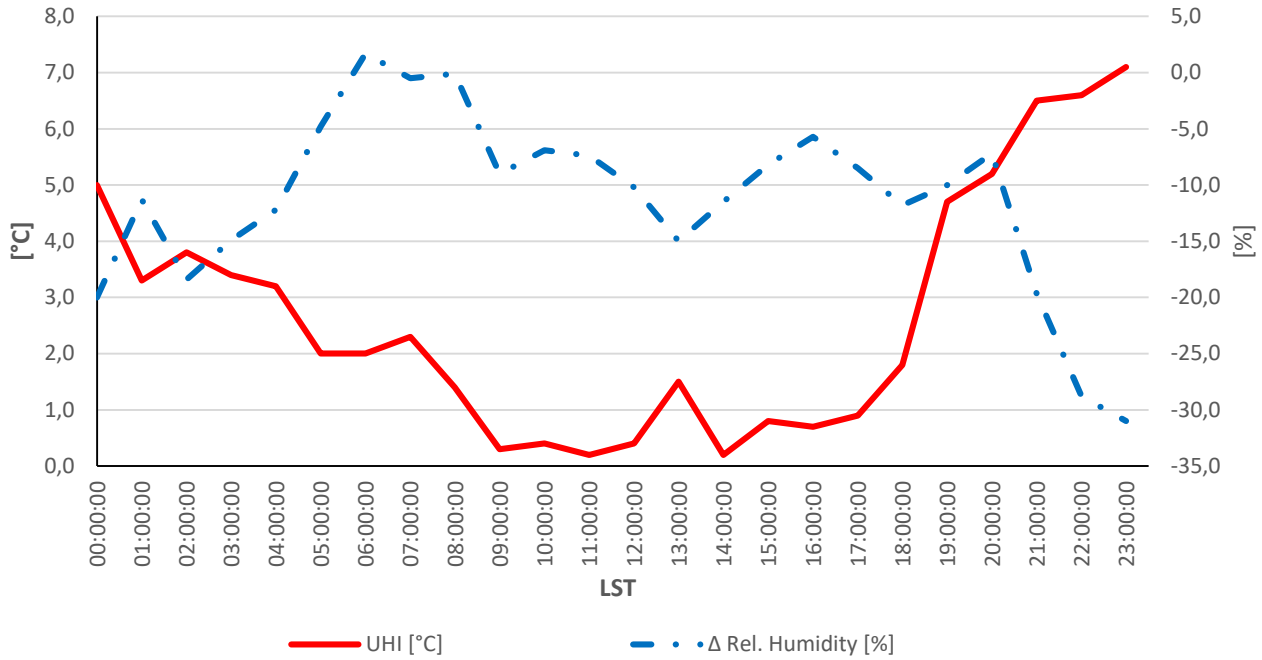


Figura 48. UHI e differenza di umidità relativa per il giorno 19/06/2015

L'umidità relativa rilevata in viale Marche risulta essere inferiore rispetto a quella rilevata a Linate, con un andamento che ricalca, seppur a segni invertiti, quello della UHI (Figura 32). In particolare, si è trovato che, in media, Linate ha un'umidità mediamente superiore rispetto a viale Marche dell'11.3% con punte del 31% alle ore 23.00; l'unico momento della giornata in cui l'umidità è maggiore di 1.7% in viale Marche rispetto a Linate è alle 6.00.

Inoltre, sono state analizzate anche le velocità del vento e si è visto che mediamente la velocità del vento è maggiore a Linate di 0.4 m/s con punte di 2.7 m/s alle ore 19.00 e alle 22.00 (Figura 33). Mentre, in viale Marche la velocità del vento supera quella di Linate di 1.5 m/s alle 08.00 e di 1.4 m/s alle 09.00.

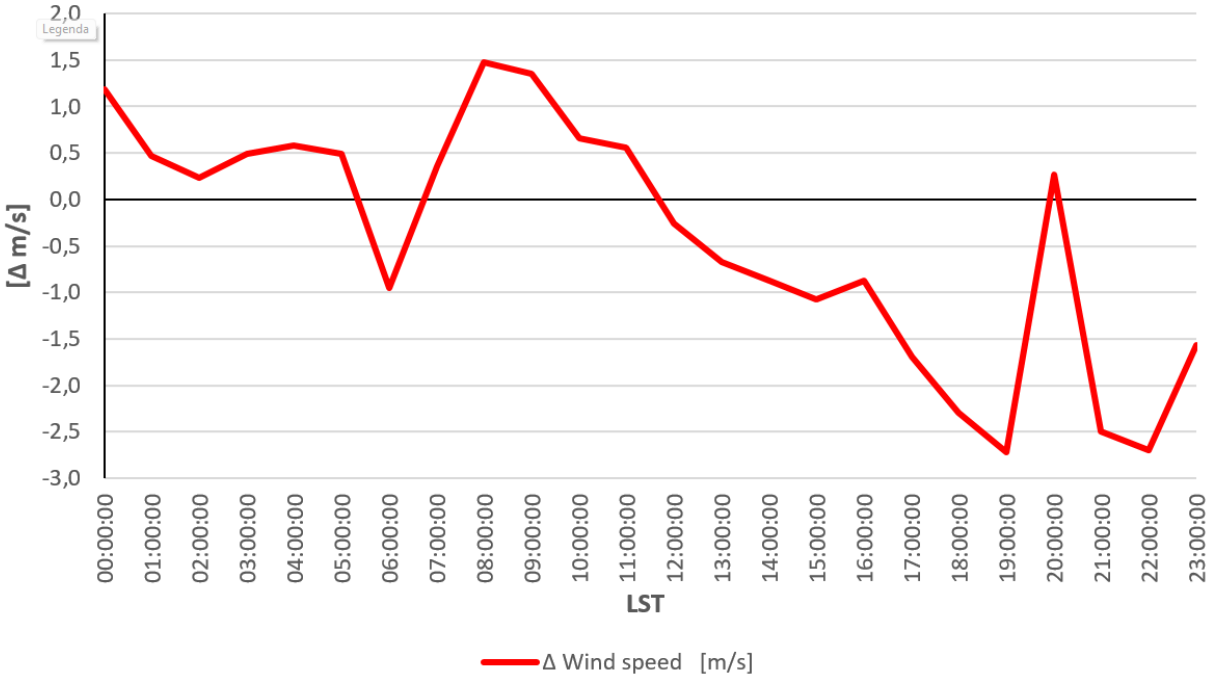


Figura 49. Differenza nella velocità del vento per il giorno 19/06/2015

In modo analogo è stata indagata anche l'UHI durante un'ondata di calore (i.e., 7 luglio 2015) così come la differenza di umidità e della ventosità rilevata dalle due centraline meteorologiche.
La Figura 34 mostra che l'isola di calore rilevata in viale Marche 71 ha una magnitudo media di 0.6 °C con picchi di 2.7 °C tra le 21.00 e le 23.00; si osserva inoltre che tra le 6.00 e le 11.00 la temperatura registrata in viale Marche è inferiore rispetto a quella registrata a Linate (ad eccezione delle ore 09.00 quando la supera di appena 0.2°C), con un minimo di -1 °C alle 07.00. Confrontando i valori dell'UHI rilevati durante un'ondata di calore (i.e., 7 luglio 2015) con quelli registrati durante una giornata estiva tipica (i.e., 19 giugno 2015) si può notare che la massima magnitudo dell'isola di calore è pari alla media della giornata estiva (i.e., 2.7°C). Infatti, risulta che seppure la temperatura media in viale Marche registrata durante l'ondata di calore sia superiore (i.e., 31.3 °C) di ben 8.4 °C rispetto a quella registrata in un giorno tipico estivo (i.e., 22.9 °C), l'UHI risulta molto simile poiché la temperatura media registrata durante un'ondata di calore a Linate (i.e., 30.8 °C) è superiore di circa 10.6 °C rispetto ad una giornata tipica estiva (i.e., 20.2 °C).
È possibile notare, inoltre, che, contrariamente a quanto notato nella giornata estiva, in media l'umidità relativa registrata in viale Marche è molto superiore rispetto a quella registrata a Linate, di media del 35.3% con un picco di oltre il 48% alle 9.00 e alle 11.00.

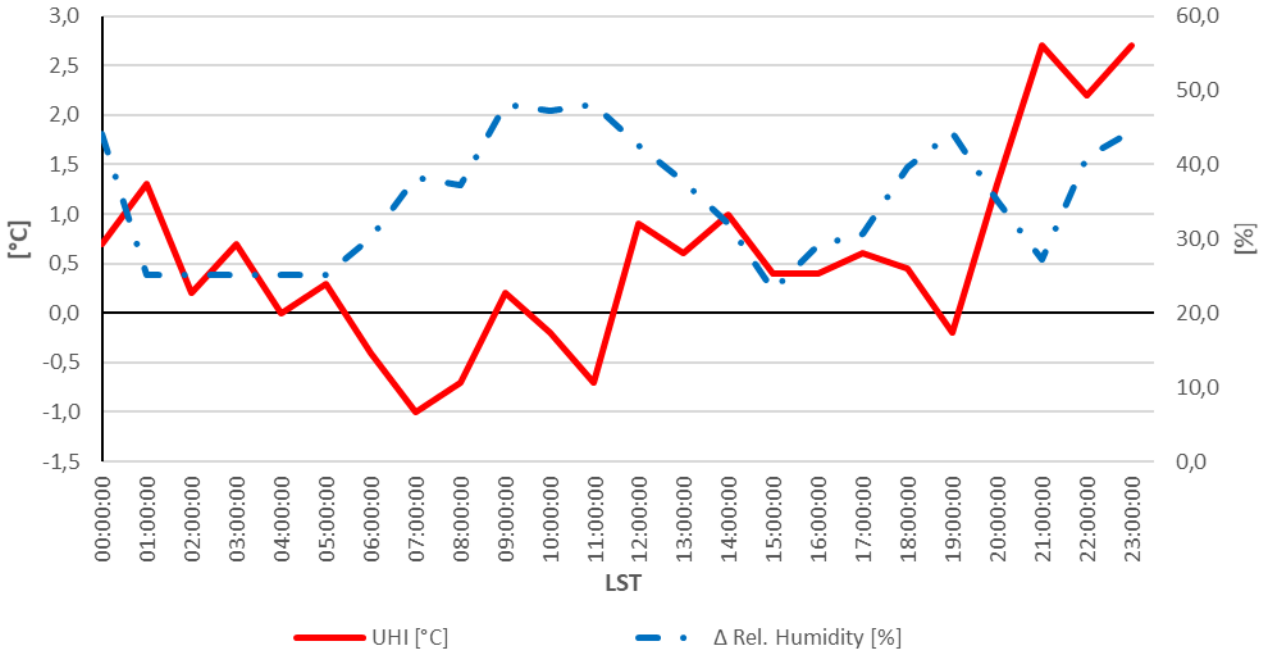


Figura 50. UHI e differenza di umidità relativa per il giorno 07/07/2015

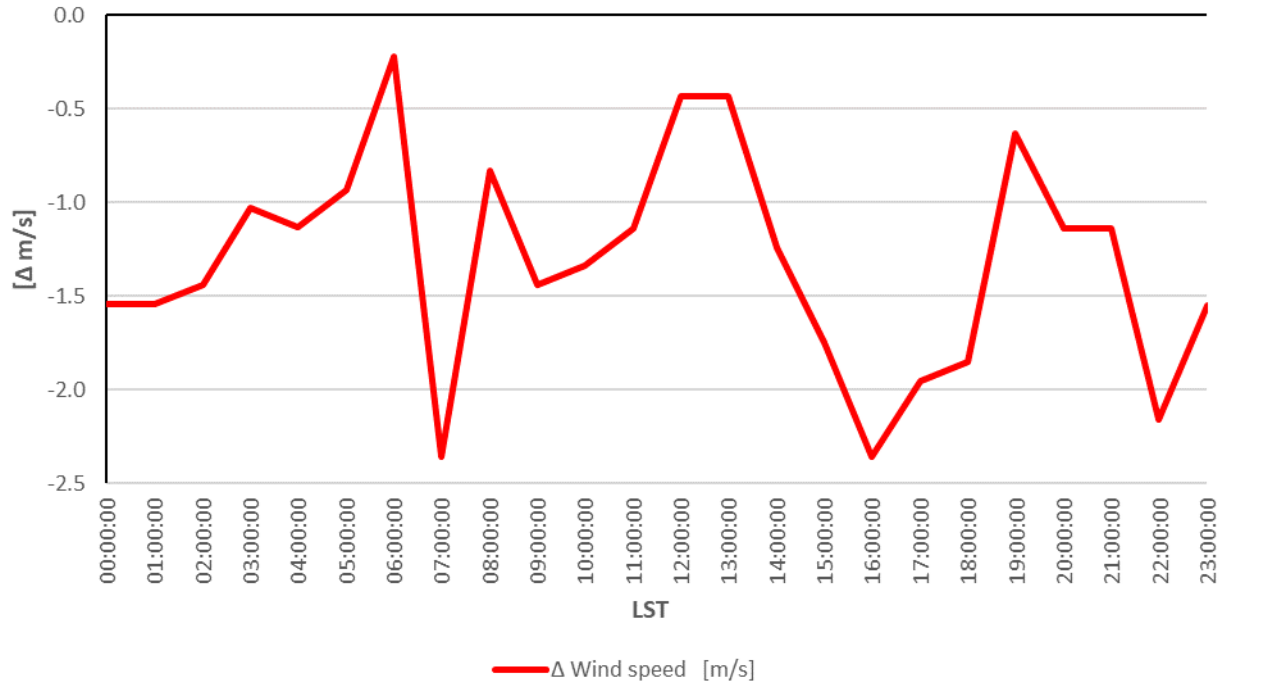


Figura 51. Differenza nella velocità del vento per il giorno 07/07/2015

Dall'analisi dei dati relativi alla ventosità risulta che in media la velocità del vento è di 1.3 m/s inferiore in viale Marche rispetto a Linate, con punte di -2.4 m/s alle 07.00 e alle 16.00, -2 m/s alle 17.00 e -1.9 m/s alle 18.00.

4 Caratteristiche termiche delle tecnologie verdi d'involucro

Al fine di indagare come le tecnologie verdi d'involucro possano influenzare il comportamento termico degli archetipi di edificio individuati per ciascuna città, ad ogni materiale componente i tetti e le pareti verdi, che a loro volta costituiscono le strategie di mitigazione dell'UHI, sono state attribuite sia le caratteristiche termiche sia quelle idrauliche. Rispetto a quanto riportato nel report del 2020, la composizione dello strato di coltura del tetto verde estensivo è stata modificata poiché la precedente composizione del suolo non poteva essere modellata in ENVI-met a causa della mancanza di dati. Invece, per la composizione di seguito riportata è stato possibile ricavare tutti i parametri termici (Tabella 19) e idraulici (Tabella 20) necessari sia per la modellazione in ENVI-met sia per l'inserimento nel foglio di calcolo semplificato che verrà utilizzato per il calcolo della variazione del fabbisogno termico dell'archetipo di edificio individuato per ciascuna delle tre città.

Tabella 19. Materiali e vita utile dei componenti costituenti un tetto verde estensivo. Dati modificati da: [10]

Componente	Materiale	Densità [kg/m³]	Spessore [mm]	Resistenza termica [m² K/W]	Capacità termica volumetrica [(J/m³ K)10⁶]	Conduttività termica [W/mK]
Vegetazione	Mix di *sedum*		200	-		
Strato di coltura (Vulcaflor) [1]	Lapillo 54.6%	984 [2]	100	0.005	1.328400	0.33 [3]
	Pomice 21%					
	Zeolite 8.4%					
	Torba 16%					
Membrana filtro	Polipropilene		1	0.003		
Strato drenante	Schiuma di polistirene in grani		50	0.056		
Guaina idrorepellente	Bitume		8	0.03		

[1] La composizione è quella del Vulcaflor estensivo [11]
[2] [12]
[3] Comunicazione personale da EuroPomice. Il valore di conduttività termica è riferito al 50% di saturazione

Tabella 20. Caratteristiche idrauliche dello strato di coltura (Vulcaflor)

Materiale (Vulcaflor) [1]	Densità [kg/m³]	Contenuto di acqua residuo [m³/m³]	Contenuto di acqua satura [m³/m³]	Capacità di campo [m³/m³]	Conduttività idraulica a saturazione [m/s]	Potenziale di matrice [m]	Costante b di Clapp e Hornberger
Lapillo	984 [2]	0.165 [2]	0.4 [2]	0.186464 [3]	0.0008 [2]	-0.09 [4]	4.38 [4]
Pomice							
Zeolite							
Torba							

[1] I materiali costituenti lo strato colturale del tetto verde sono tutti presenti nel *database* del *software* SimaPro ad esclusione del lapillo. Tuttavia, sia la pomice che i lapilli sono rocce piroclastiche che si differenziano per le dimensioni dei loro frammenti. Pertanto, nelle analisi LCA il processo "lapillo" è stato approssimato al processo "pomice"
[2] [12]
[3] [13]
La capacità di campo è stata calcolata come segue:

$$\frac{\theta_{fc} - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = n^{-0.60(2+log_{10}(k_s))}$$

θfc = contenuto d'acqua a capacità di campo
θs = contenuto d'acqua a saturazione
θr = contenuto d'acqua a residuo
n = parametro n di van Geuthen, stimato da [12] per il Vulcaflor (n = 2.28)
Ks = conduttività idraulica a saturazione
[4] I dati sono stati ricavati dal software ENVI-met. In particolare, sono stati considerati i dati corrispondenti a "sabbia limacciosa" [14, pag.]

Inoltre, rispetto a quanto riportato nel report 2020 [15] la tipologia di *living wall* utilizzata nelle simulazioni è stata modificata, ovvero si è optato per l'utilizzo di un *living wall* basato su fioriere con un substrato in torba

anziché un *living wall* idroponico. Tale cambiamento è dovuto all'impossibilità di modellare il *living wall* idroponico all'interno del *software* ENVI-met, dovuta, a sua volta, al limitato numero di materiali che si possono inserire nella modellazione degli elementi costruttivi degli edifici, e quindi anche delle tecnologie verdi di involucro. Uno schema del *living wall* adottato, al netto della chiusura verticale di involucro esistente, è presentato in Figura 52.

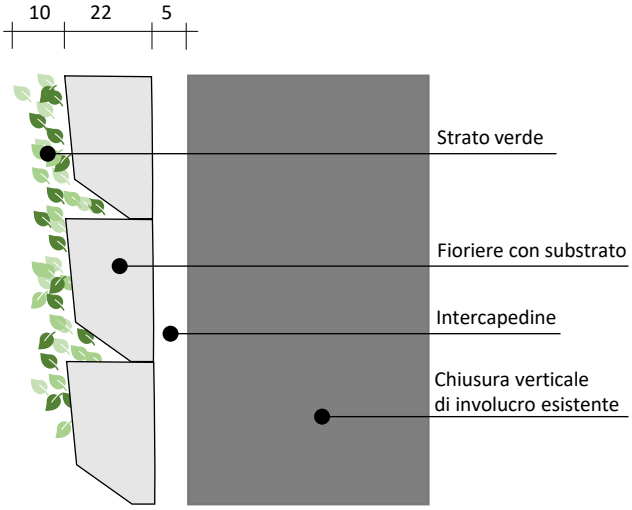


Figura 52. Living wall con fioriere

Rispetto a quanto riportato nel report 2020, lo strato di vegetazione è stato meglio definito. In particolare, è stata scelta la felce, che appartiene alla classe delle pteropsidie ed è una pianta sempreverde.
Le caratteristiche dimensionali e termofisiche del living wall adottato, al netto della chiusura verticale di involucro esistente, sono riportate in Tabella 21.

Tabella 21. Materiali dei componenti costituenti un living wall basato su fioriere

Componente	Materiale	Spessore [mm]	Densità [kg/m³]	Capacità termica [J/kg K]	Conduttività termica [W/mK]	Resistenza termica [m² K/W]	Capacità termica volumetrica [(J/m³ K)10⁶]
Vegetazione	Felce [1]	200	-	-	-	-	-
Fioriera	Polietilene (HDPE)	3	980 [2]	1800 [2]	0.50 [2]	0.006	1.764
Substrato	Torba	214	450 [3]	1858	0.350 [4]	0.611	0.836 [5]
Fioriera	Polietilene (HDPE)	3	980 [2]	1800 [2]	0.50 [2]	0.006	1.764
Intercapedine d'aria	Aria	50	-	1006	-	0.180	-

[1] LAI: 3.79 [16]
[2] Dati da [17]
[3] Valore per torba a bassa densità apparente [18]
[4] Valore medio tra il valore secco e quello a completa saturazione, dati di origine [18]
[5] Valore da database ENVI-met

Diversamente dalla facciata verde e dal tetto verde estensivo, il living wall non è stato utilizzato negli scenari di mitigazione scelti per la valutazione degli impatti LCA (Sezione 10). Di conseguenza i dati relativi alla vita utile e alla disponibilità in SimaPro non sono stati presentati di seguito.

5 Modellazione degli scenari di mitigazione in ENVI-met

Per la realizzazione dei modelli degli scenari di mitigazione in ENVI-met, prima di tutto, si è provveduto allo sviluppo degli elementi di *database* mancanti. In particolare, per il tetto verde estensivo è stato modellato il *mix* di *Sedum* (Figura 53) e il substrato vegetazionale, ovvero il Vulcaflor.

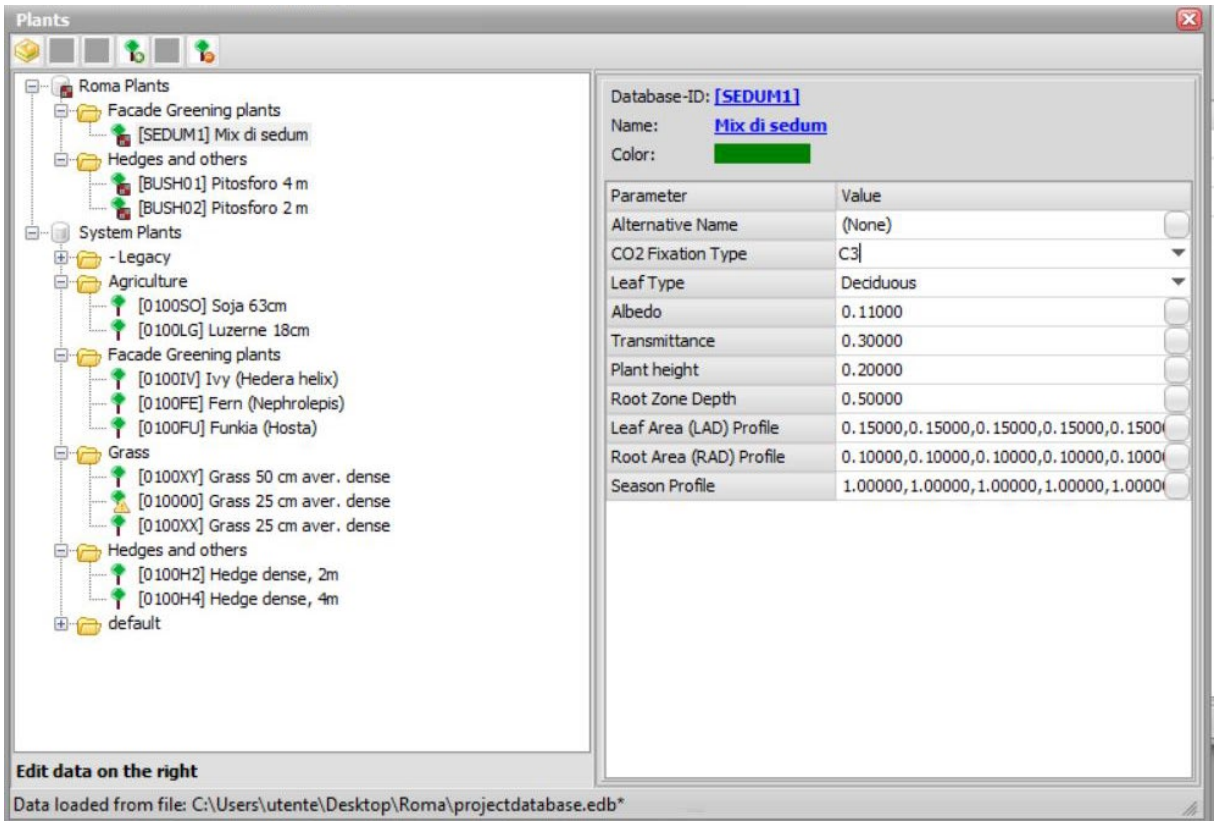


Figura 53. Scheda di *database* ENVI-met relativa al mix di *Sedum*

La Figura 54 mostra la scheda di *database* relativa allo strato colturale Vulcaflor. Per la realizzazione della quale scheda è stato necessario riportare le caratteristiche termiche ed idrauliche della miscela di materiali che lo costituiscono (Tabella 19 e Tabella 20).

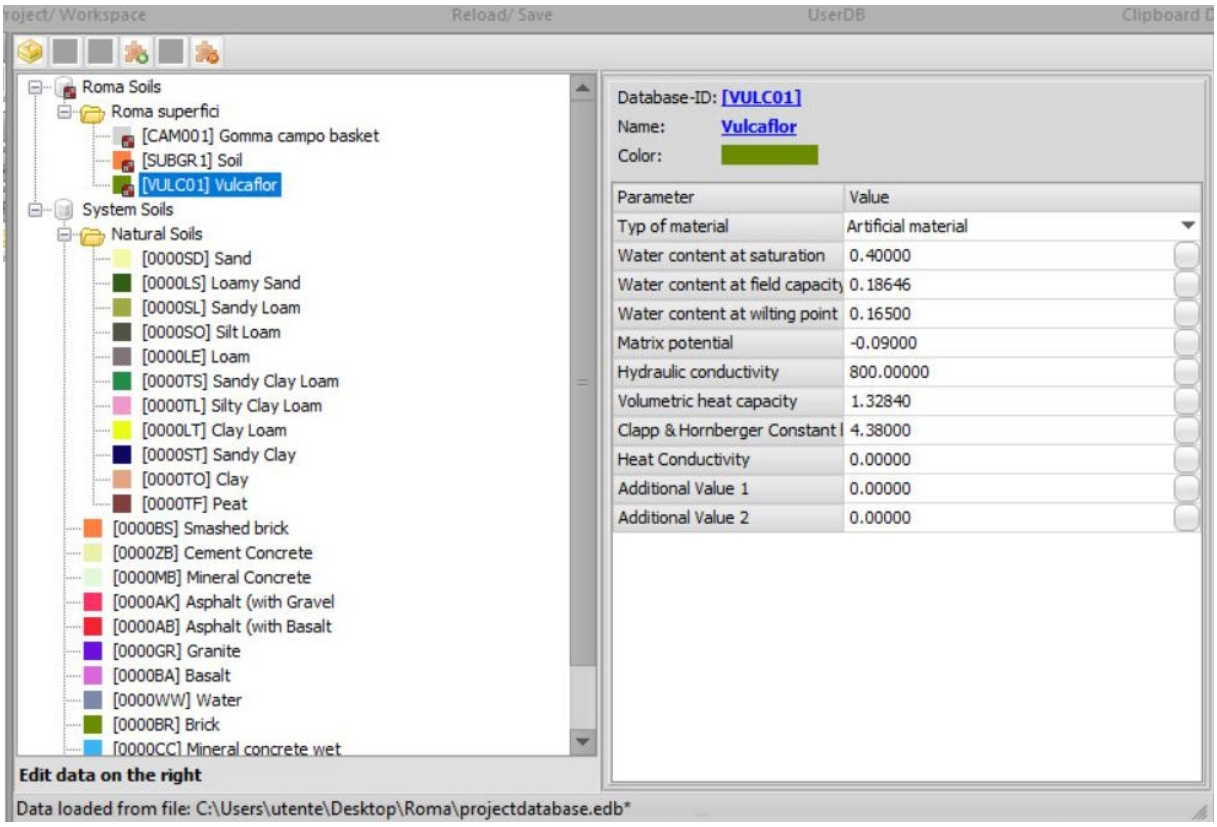


Figura 54. Scheda di *database* ENVI-met relativa al Vulcaflor

Inoltre, dato che nella modellazione delle schede di *database* in ENVI-met è possibile inserire solo stratigrafie costituite da tre materiali, si è provveduto a realizzare uno strato intermedio per il tetto verde che fosse equivalente dal punto di vista delle caratteristiche termiche ed idrauliche allo strato drenante in polistirene espanso sinterizzato (EPS) e alla membrana in polipropilene (Figura 55).

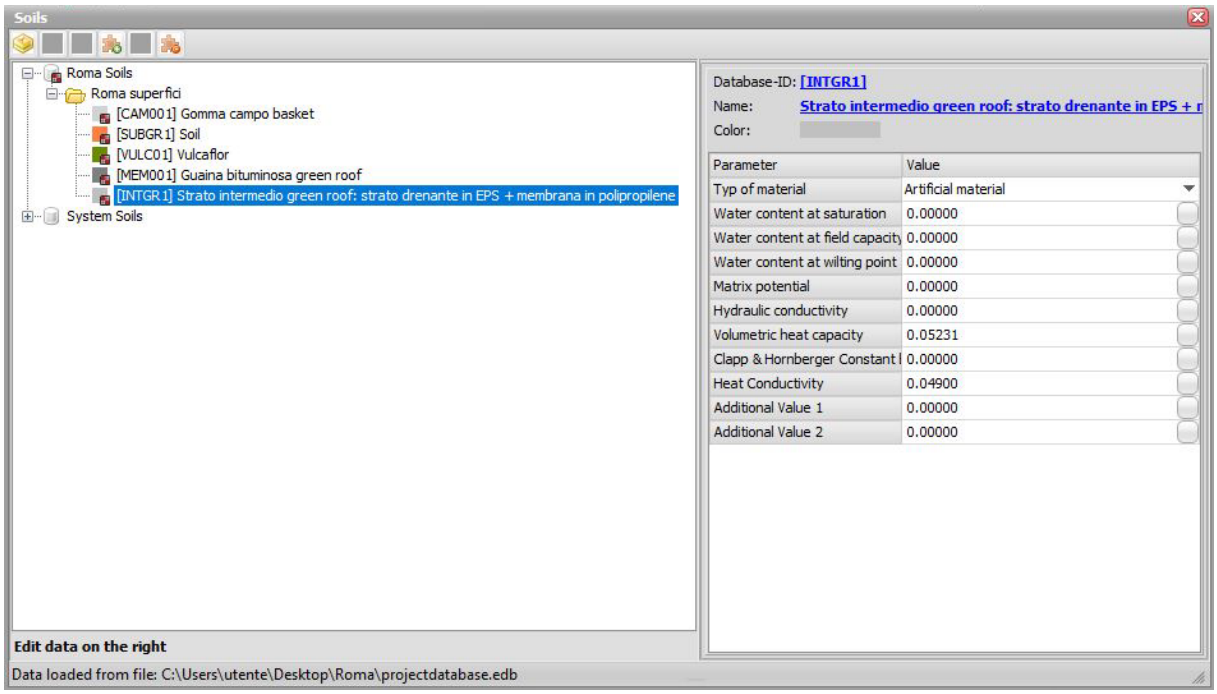


Figura 55. Scheda di *database* ENVI-met relativa allo strato drenante e alla membrana in polipropilene

Infine, alla stratigrafia del tetto verde estensivo è stata aggiunta la guaina bituminosa. La Figura 56 mostra la scheda di *database* ENVI-met relativa all'intero tetto verde estensivo.

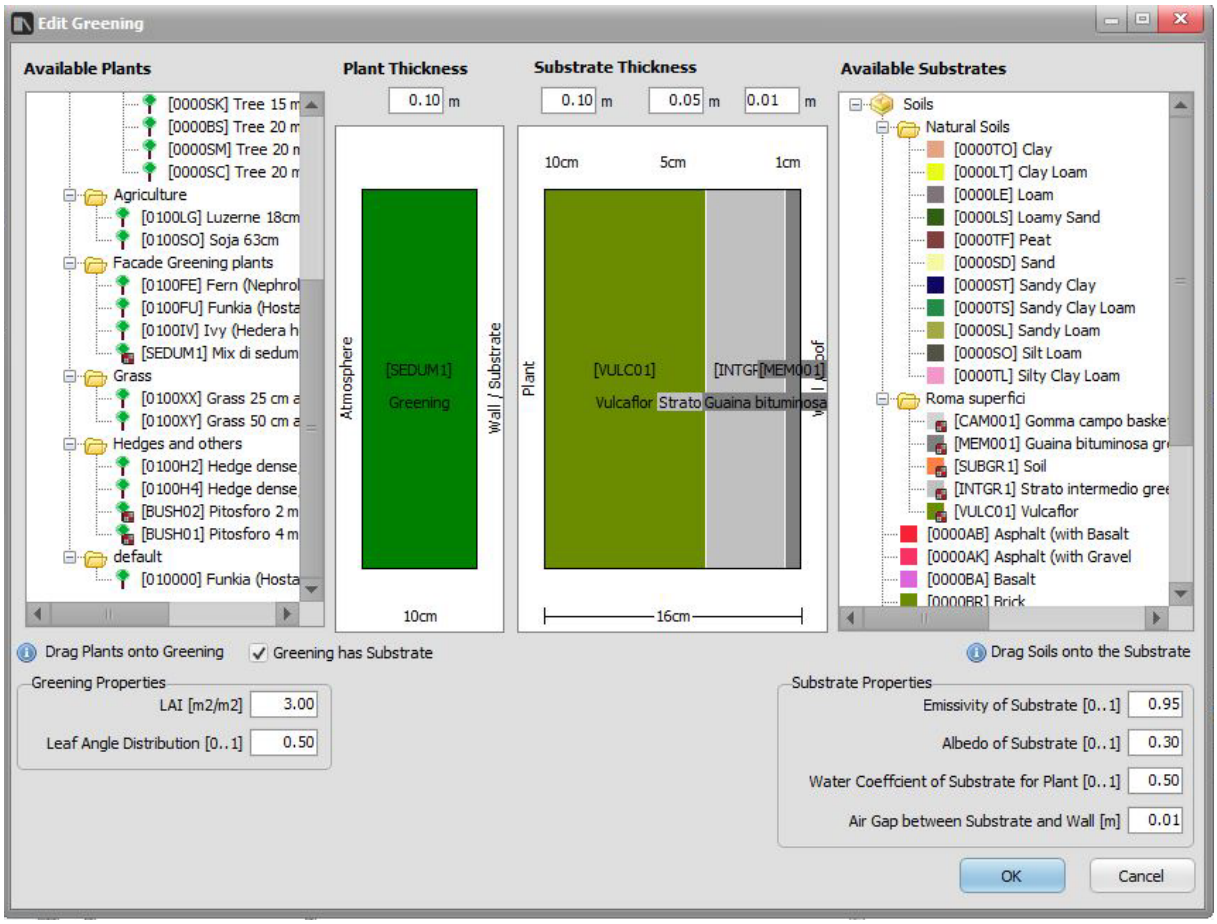


Figura 56. Scheda di *database* ENVI-met relativa al tetto verde estensivo

Per il tetto verde è stato impostato un LAI intermedio pari a 3, un angolo fogliare pari a 0.5 che corrisponde ad un orientamento delle foglie di 45° rispetto all'orizzontale. Per il substrato è stata impostata una emissività pari a 0.95. Il contenuto d'acqua è stato impostato pari al 50% a cui corrispondono i valori idrici e termici riportati in Tabella 19 e Tabella 20. Infine, è stato incluso uno strato minimo di distanziamento tra la membrana bituminosa e la muratura pari a 1 cm, ovvero pari al minimo consentito dal *software*.

Alla scheda di database relativa al tetto verde estensivo è stato attribuito un codice alfanumerico univoco (i.e., EXGR01).

Per la modellazione della facciata verde è stato necessario solo inserire lo strato di *hedera helix* dello spessore di 10 cm, dal momento che gli altri strati che costituiscono la facciata verde (i.e., supporti e distanziatori) sono strati discontinui. La Figura 57 mostra la scheda di database costruita in ENVI-met.

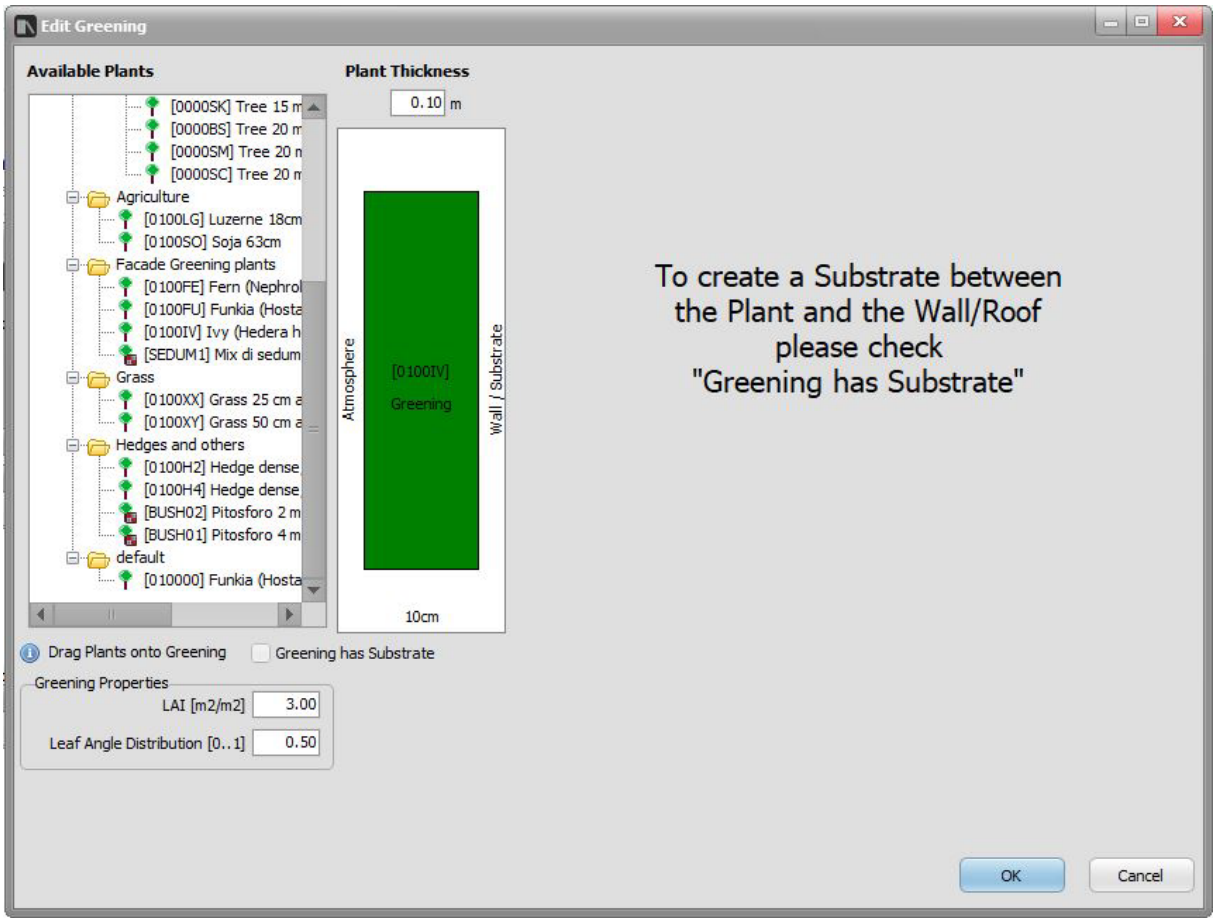


Figura 57. Scheda di *database* ENVI-met relativa alla facciata verde

Anche in questo caso, per la modellazione, è stato considerato un LAI medio pari a 3 ed una inclinazione fogliare pari a 0.5. Alla scheda di database relativa alla facciata verde è stato attribuito un codice alfanumerico univoco (i.e., GRFA01).

Ai fini della modellazione del *living wall* è stato necessario sviluppare l'elemento di *database* mancante: il polietilene ad alta densità (HDPE) di cui sono costituite le fioriere che contengono il substrato (Figura 58).

Il *living wall* è stato quindi modellato inserendo uno strato di felce dello spessore di 10 cm. Poiché la stratigrafia del substrato può essere costituita solo da tre elementi e poiché si è evitato di porre uno strato di polietilene espanso direttamente a contatto con lo strato di felce, lo strato di torba è stato suddiviso in due strati di 11 e 10 cm, ed i due strati di polietilene costituenti la fioriera sono stati accorpati in un unico strato di 1 cm (Figura 59).

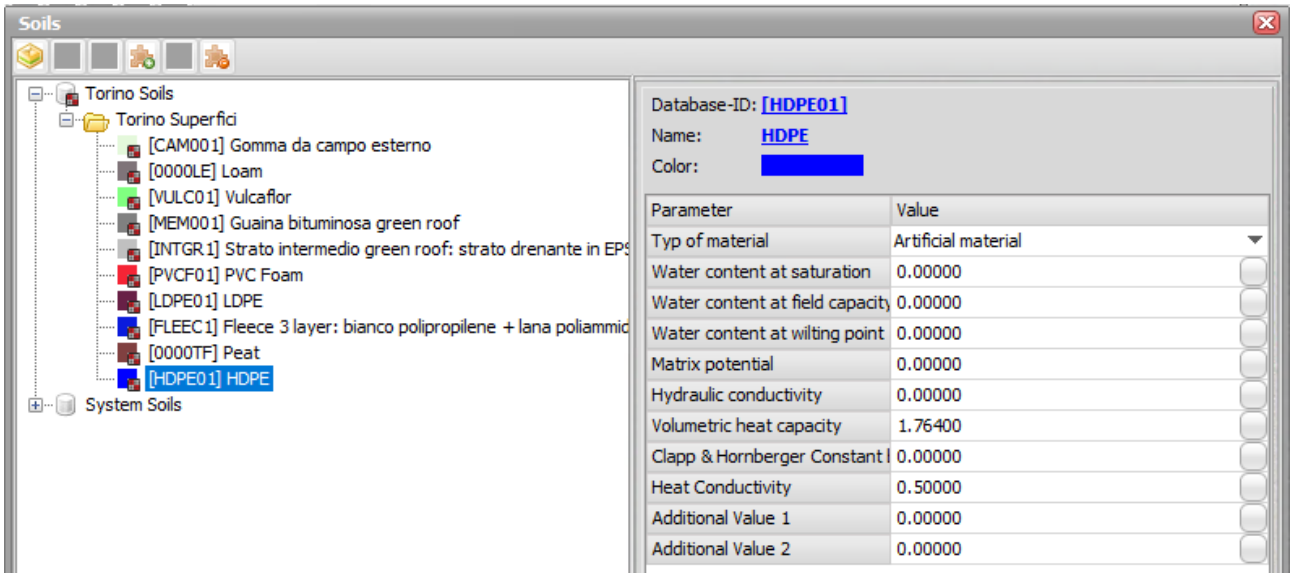


Figura 58. Scheda di *database* ENVI-met relativa al Polietilene ad alta densità

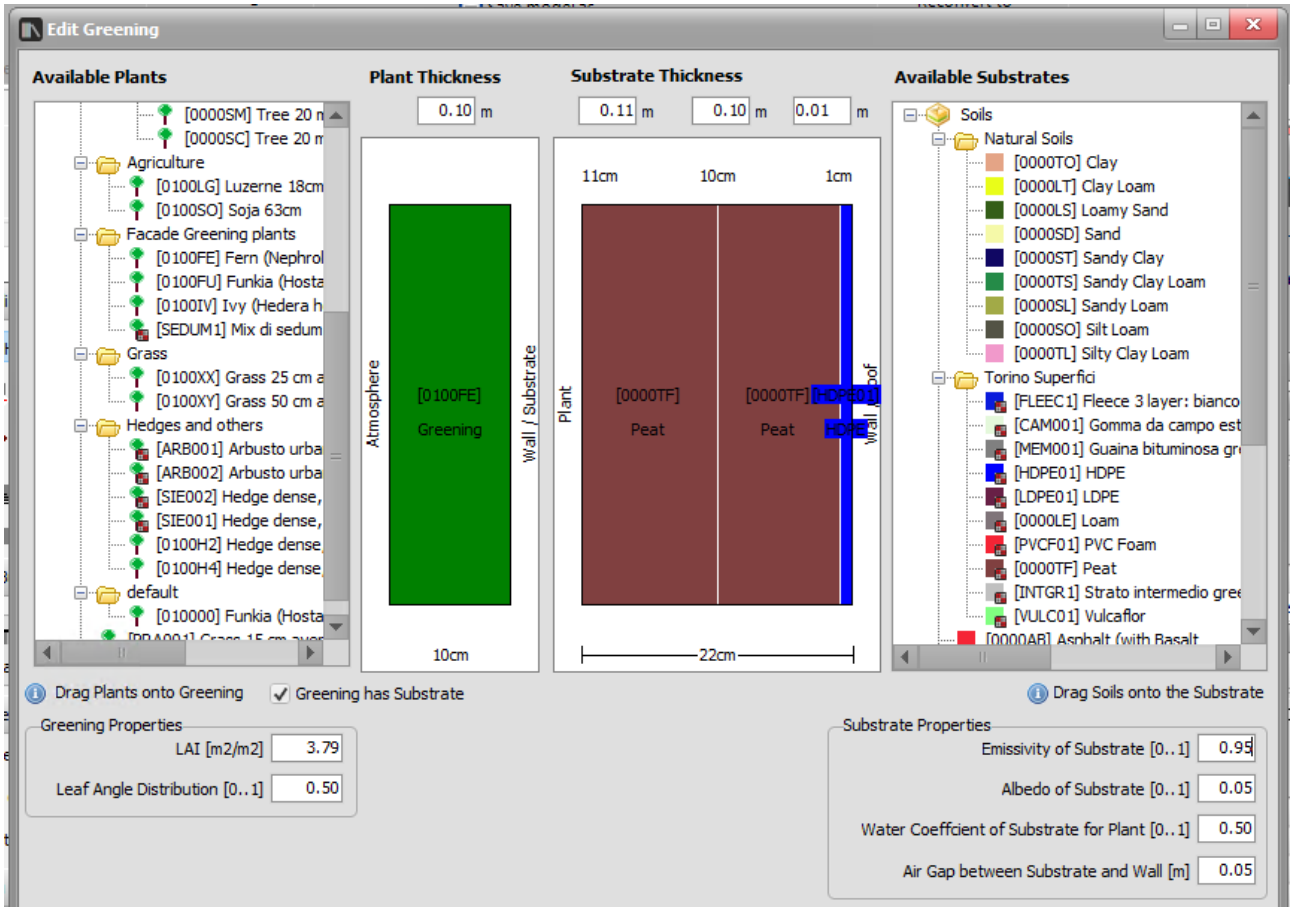


Figura 59. Scheda di *database* ENVI-met relativa al *living wall*

Per la modellazione, è stato considerato un LAI medio pari a 3.79 ed una inclinazione fogliare pari a 0.5. Per l'albedo del substrato è stato scelto un valore pari a 0.05, coerente con il polietilene delle fioriere, considerato nero; alla luce di tale scelta, e ipotizzando che l'emissività possa essere considerata pari al coefficiente di assorbimento, l'emissività è stata scelta pari a 0.95. Alla scheda di database relativa al l*iving wall* è stato attribuito un codice alfanumerico univoco (i.e., LIVW01).

Utilizzando il *software* QGIS, allo *shapefile* relativo agli edifici sono stati aggiunti due attributi. Uno relativo ai tetti verdi e l'altro relativo alle pareti verdi.

5.1 Roma

Per quel che riguarda gli scenari per l'area urbana di Roma, di seguito è riportata una tabella riassuntiva in cui sono stati indicati, per ciascuno degli scenari sviluppati, i codici relativi alle chiusure orizzontali e verticali di involucro e i codici relativi alle tecnologie verdi di involucro (Tabella 22).

Tabella 22. Scenari per il modello relativo all'area urbana di Roma

	Baseline scenario		Scenario RM1			Scenario RM2				Scenario RM3		
Codice identificativo dell'edificio	**Codice ENVI-met chiusura orizzontale di copertura**	**Codice ENVI-met chiusura verticale di involucro**	**Codice ENVI-met chiusura orizzontale di copertura**	**Codice ENVI-met chiusura verticale di involucro**	**Codice ENVI-met green roof**	**Codice ENVI-met chiusura orizzontale di copertura**	**Codice ENVI-met chiusura verticale di involucro**	**Codice ENVI-met green roof**	**Codice ENVI-met green wall**	**Codice ENVI-met chiusura orizzontale di copertura**	**Codice ENVI-met chiusura verticale di involucro**	**Codice ENVI-met *green wall***
1537830	COP011	MCV011	COP011	MCV011	EXGR01	COP011	MCV011	EXGR01	GRFA01	COP011	MCV011	
1537606	COP012	MCV011	COP012	MCV011	EXGR01	COP012	MCV011	EXGR01	GRFA01	COP012	MCV011	
1537810	CIN031	MCV011	CIN031	MCV011		CIN031	MCV011		GRFA01	CIN031	MCV011	
1538315	CIN031	MCV012	CIN031	MCV012		CIN031	MCV012		GRFA01	CIN031	MCV012	
1509182	COP012	MCV011	COP012	MCV011	EXGR01	COP012	MCV011	EXGR01	GRFA01	COP012	MCV011	
1509213	COP012	MCV012	COP012	MCV012	EXGR01	COP012	MCV012	EXGR01	GRFA01	COP012	MCV012	
1508899	COP013	MCV011	COP013	MCV011	EXGR01	COP013	MCV011	EXGR01	GRFA01	COP013	MCV011	
1509268	COP011	MCV011	COP011	MCV011	EXGR01	COP011	MCV011	EXGR01	GRFA01	COP011	MCV011	
1509255	COP012	MCV011	COP012	MCV011	EXGR01	COP012	MCV011	EXGR01	GRFA01	COP012	MCV011	
1537429	COP012	MCV011	COP012	MCV011	EXGR01	COP012	MCV011	EXGR01	GRFA01	COP012	MCV011	GRFA01
1509374	COP012	MCV013	COP012	MCV013	EXGR01	COP012	MCV013	EXGR01	GRFA01	COP012	MCV013	
1509325	COP012	MCV011	COP012	MCV011	EXGR01	COP012	MCV011	EXGR01	GRFA01	COP012	MCV011	
1539172	COP012	MCV011	COP012	MCV011	EXGR01	COP012	MCV011	EXGR01	GRFA01	COP012	MCV011	

1537442	COP012	MCV011	COP012	MCV011	EXGR01	COP012	MCV011	EXGR01	GRFA01	COP012	MCV011	
1509571	COP013	MCV011	COP013	MCV011	EXGR01	COP013	MCV011	EXGR01	GRFA01	COP013	MCV011	
1563125	COP013	MCV011	COP013	MCV011		COP013	MCV011		GRFA01	COP013	MCV011	
1563515	COP013	MCV014	COP013	MCV014	EXGR01	COP013	MCV014	EXGR01	GRFA01	COP013	MCV014	
1538613	COP013	MCV012	COP013	MCV012		COP013	MCV012		GRFA01	COP013	MCV012	
1539110	COP011	MCV015	COP011	MCV015	EXGR01	COP011	MCV015	EXGR01	GRFA01	COP011	MCV015	
1539063	COP011	MCV012	COP011	MCV012	EXGR01	COP011	MCV012	EXGR01	GRFA01	COP011	MCV012	
1563612	COP011	MCV013	COP011	MCV013	EXGR01	COP011	MCV013	EXGR01	GRFA01	COP011	MCV013	
1563625	COP011	MCV014	COP011	MCV014	EXGR01	COP011	MCV014	EXGR01	GRFA01	COP011	MCV014	

Gli *shapefile* contenenti i codici relativi al tetto verde estensivo e alla facciata verde sono stati importati nel *software* ENVI-met dove sono stati utilizzati per sviluppare il *baseline scenario* e i tre scenari di mitigazione dell'isola di calore urbana coerentemente con quanto riportato in Tabella 22.

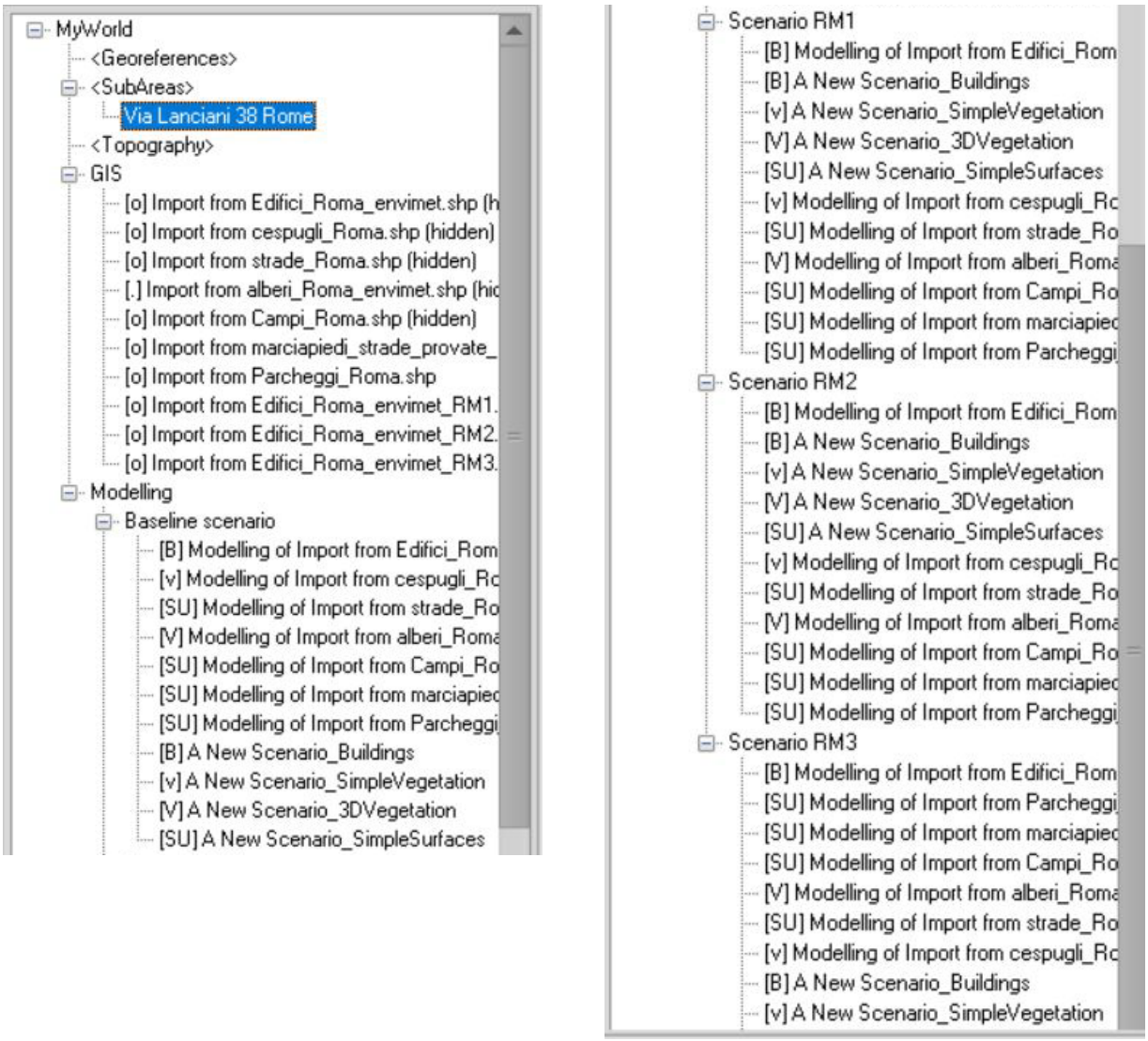


Figura 60. Modellazione degli scenari in ENVI-met per l'area urbana selezionata di Roma

I modelli ottenuti con l'applicazione del DEM sono stati confrontati, in termini altimetrici, con i dati prodotti da Google Earth. In particolare, sono state identificate in *Google Earth* le tre aree urbane e sono state ricavate le quote altimetriche e le differenze relative di quota in diversi punti delle tre aree. Per gli stessi punti sono state ricavate le quote altimetriche dal modello ENVI-met riportante il DEM e, le stesse sono state messe al confronto. Si è visto che, nel modello ENVI-met, non solo le quote altimetriche assolute (i.e., sul livello del mare) differivano da quelle trovate in *Google Earth*, ma che anche le differenze di quota tra punti nella stessa area differivano dalle stesse differenze misurate in *Google Earth*. In particolare, le quote e le differenze di quota relative al modello ENVI-met risultavano maggiori di quelle trovate interrogando *Google Earth*. Tuttavia, le differenze di quota per le tre aree sono risultate essere contenute nell'ordine massimo di circa 10 m, come nel caso dell'area urbana di Roma. Per differenze di quota limitate, come nel caso delle tre aree urbane di Roma, Milano e Torino, gli sviluppatori del *software* ENVI-met suggeriscono di eliminare il DEM nel modello ENVI-met poiché il suo contributo nella simulazione risulterebbe del tutto marginale se non nullo. Inoltre, gli stessi sviluppatori

suggeriscono, in caso di differenza altimetrica contenuta all'interno della stessa area, di eliminare il DEM per ovviare a problemi di instabilità del modello stesso. A seguito di quanto riportato, i DEM sono stati eliminati dai tre modelli.

Al fine di ottenere un modello che restituisse *output* più precisi, la griglia è stata affinata passando 5m x 5m x 5m a 3m x 3m x 3m. Per fare in modo che il modello non restituisse errori è stata modificata la dimensione dell'area passando, nel caso di Roma, da 240 m x 340 m a 270 m x 370 m e con un numero di celle lungo l'asse z pari a 15 (Figura 61). Inoltre, sono state indicate 18 celle come celle vuote nel piano xy. Si è scelto, inoltre, di suddividere le griglie lungo l'asse z in cinque sotto-celle e di applicare un fattore telescopico del 30% che cominci da un'altezza superiore ai 26 m. Il modello è stato ispezionato in *Spaces* per verificarne la correttezza (Figura 62).

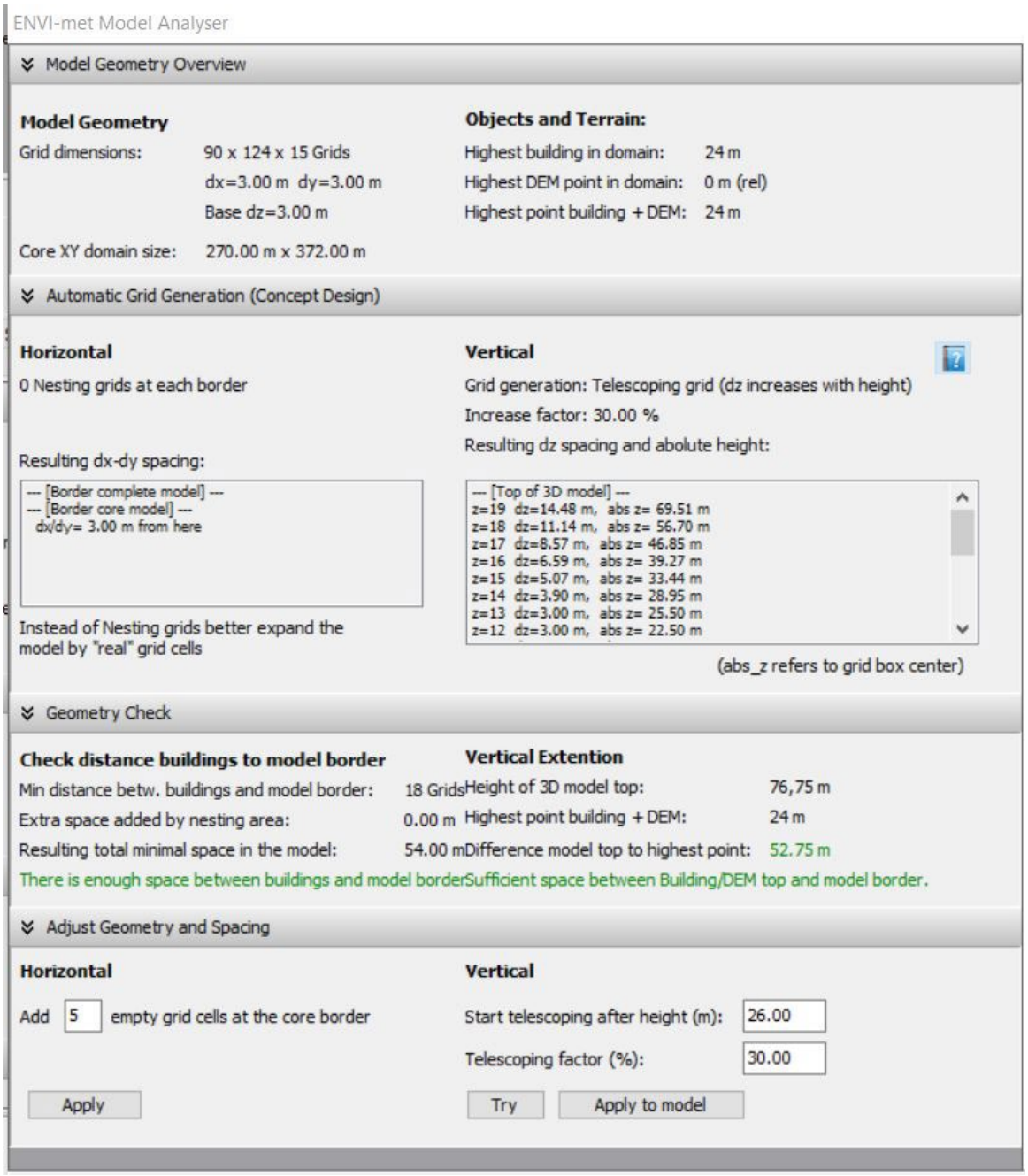


Figura 61. Definizione del modello ENVI-met per l'area urbana selezionata di Roma

Nei modelli sono stati inseriti i "*receptors*" al fine di verificare con maggiore precisione i dati meteorologici in particolari punti all'interno del modello. In particolare, nel modello di Roma sono stati inseriti 20 ricettori.

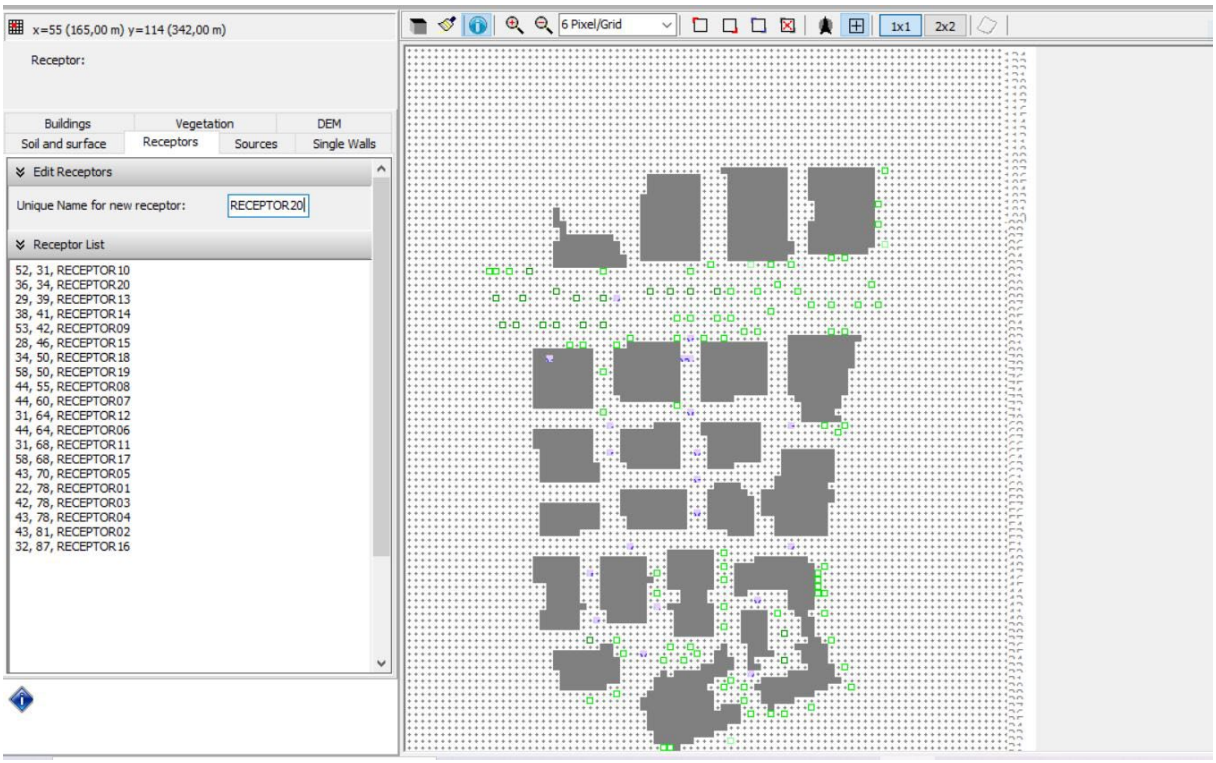


Figura 62. Indicazione dei *receptors* nel modello ENVI-met per l'area urbana selezionata di Roma

Di seguito sono riportate le immagini relative alla visualizzazione 3D degli scenari sviluppati Figura 63.

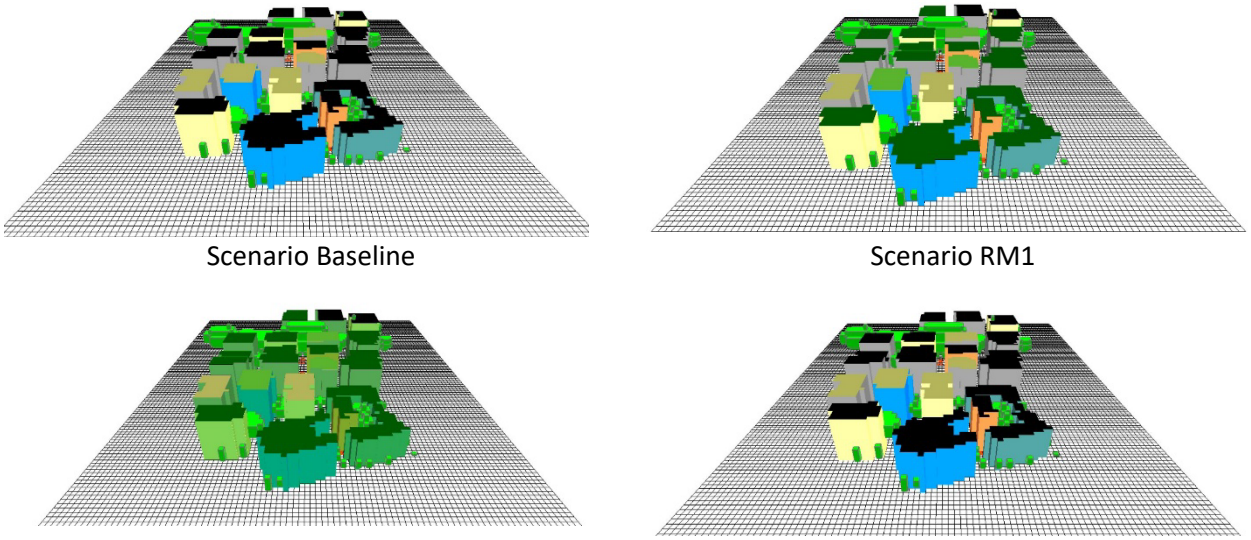


Figura 63. Visualizzazione 3D degli scenari del modello dell'area urbana selezionata di Roma

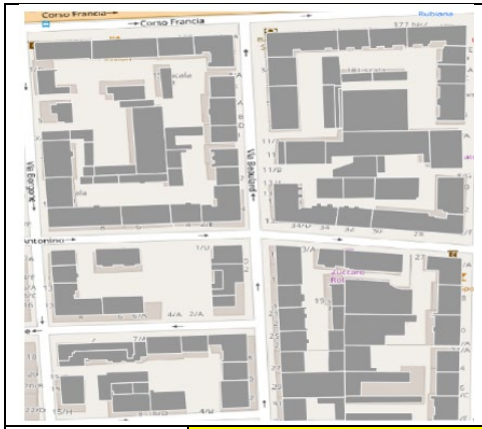
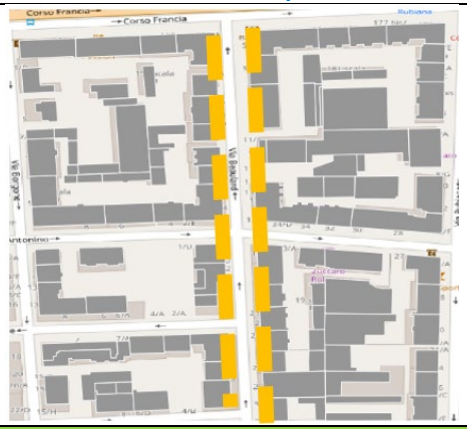
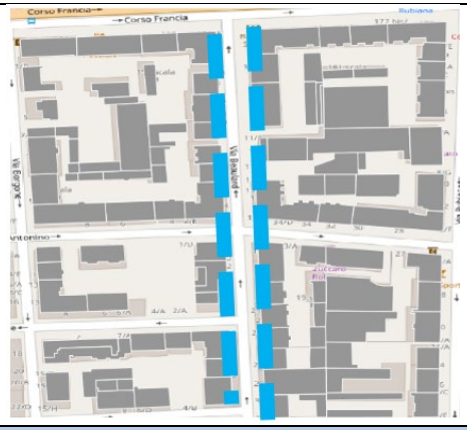
I quattro modelli sono stati forzati con l'utilizzo dei dati meteorologici relativi alle tre giornate significative (i.e., giornata tipica invernale, giornata tipica estiva, giornata con ondata di calore) della stazione di Castel di Guido. I dati meteorologici relativi alla giornata estiva e invernale non hanno dato alcun problema, mentre i dati relativa alla giornata con ondata di calore hanno dato origine a problemi di instabilità nelle celle vuote intorno al modello

dell’area urbanizzata. In particolare, si è potuto riscontrare tale problema in corrispondenza delle ore 11.00 del 22/07/2015. Si è notato che tale problema è dovuto ad una repentina variazione della velocità del vento dal valore di 1.83 m/s registrato alle ore 10.30 al valore di 0.39 m/s registrato alle ore 11.00 a quello di 3.78 registrato alle ore 11.30. Per ovviare a questi fenomeni di instabilità che avrebbero potuto compromettere i risultati della simulazione, per le sole ore 11.00 il valore della velocità del vento è stato modificato da 0.39 m/s a 2.60 m/s.

5.2 Torino

Per quel che riguarda gli scenari per l'area urbana di Torino, di seguito è riportata una tabella riassuntiva in cui sono stati indicati, per ciascuno degli scenari sviluppati, i codici relativi alle chiusure orizzontali e verticali di involucro e i codici relativi alle tecnologie verdi di involucro (Tabella 23).

Tabella 23. Scenari per il modello relativo all'area urbana di Torino

Codice identificativo dell'edificio	Baseline scenario		Scenario TO1	Scenario TO2	Scenario TO3
	Codice ENVI-met chiusura orizzontale di copertura	Codice ENVI-met chiusura verticale di involucro	Codice ENVI-met Living Wall verso via Beaulard	Codice ENVI-met Green Façade verso via Beaulard	Codice ENVI-met Living Wall verso via Lera
976821	CIN041	CMO044	-	-	-
977428	CIN041	CMO044	-	-	-
1001347	CIN054	MPL013	-	-	-
1001366	CIN051	MCV016	-	-	-
1001384	CIN051	MPL016	-	-	-
988474	CIN051	MPL016	LIVW01	GRFA01	-
1001644	CIN021	MPL023	LIVW01	GRFA01	-
1001882	CIN021	MPL023	LIVW01	GRFA01	-
1013215	CIN051	MPL023	LIVW01	GRFA01	-
992028	CIN054	CMO044	LIVW01	GRFA01	-
975950	CIN054	MCV019	LIVW01	GRFA01	-
976029	CIN054	CMO044	LIVW01	GRFA01	-
975712	CIN051	MPL016	-	-	-
964627	CIN051	MPL015	-	-	-
976006	CIN051	MPL015	-	-	-
975953	CIN051	MPL015	-	-	-
964435	CIN051	MPL015	-	-	-

964734	CIN054	MPL015	-	-	-
1013461	CIN022	MPL015	-	-	-
1001464	COP014	MPL032	-	-	-
1002084	CIN058	MPL015	-	-	-
1001664	CIN051	MPL015	-	-	-
1002112	COP015	MPL032	-	-	-
1001801	CIN051	MPL032	-	-	-
1001824	COP015	MPL033	-	-	-
964582	CIN051	MPL015	-	-	-
975951	CIN054	MPL015	-	-	-
975782	CIN054	MPL015	-	-	-
975860	COP015	MPL033	-	-	-
975385	COP015	MPL033	-	-	-
975696	COP015	MPL033	-	-	-
975855	COP015	MPL033	-	-	-
964419	COP015	MPL033	-	-	-
1001927	COP015	MPL033	-	-	-
988472	CIN051	CMO044	LIVW01	GRFA01	-
1001380	CIN054	MPL023	-	-	-
1001379	CIN041	CMO043	-	-	-
1001134	CIN054	CMO043	-	-	-
1001262	CIN054	CMO043	-	-	-
1002005	CIN054	CMO043	-	-	-
1001673	CIN054	CMO043	-	-	-
975360	COP014	MPL033	-	-	-
964783	COP014	MPL033	-	-	-
992025	COP014	MPL033	-	-	-
964813	COP014	MPL033	LIVW01	GRFA01	-
975879	COP015	MCV019	-	-	-
975944	COP015	MCV019	-	-	LIVW01
975941	COP015	MCV019	-	-	LIVW01
975636	CIN054	CMO044	LIVW01	GRFA01	LIVW01
1002106	CIN051	CMO044	LIVW01	GRFA01	-
1001573	CIN051	CMO044	LIVW01	GRFA01	-
1001503	COP015	MPL033	-	-	-
1001647	COP015	MPL033	-	-	-
1002068	COP015	MPL033	-	-	-
1029478	COP015	MPL033	-	-	-
1001602	CIN051	MCV019	-	-	-
1001580	CIN051	MCV019	-	-	-
1001675	COP015	MPL033	-	-	-
975929	COP015	MPL033	-	-	-

975608	COP013	MPL033	-	-	-
975534	COP013	MPL033	-	-	-
975852	COP013	MPL033	-	-	-
975634	CIN054	MPL033	-	-	-
1102459	CIN054	MPL033	-	-	LIVW01
1093858	CIN054	MCV018	-	-	-
1093915	CIN051	MCV019	-	-	-
1099016	CIN054	MPL022	-	-	-
1099345	CIN051	CMO044	-	-	-
1090017	CIN053	CMO042	-	-	-
1073208	CIN054	MCV018	LIVW01	GRFA01	-
1100039	COP013	MCV018	LIVW01	GRFA01	-
1099156	CIN051	MCV018	LIVW01	GRFA01	-
1098970	CIN054	CMO044			
1099281	CIN051	CMO043			
1102475	CIN051	MPL013			
976026	CIN054	MPL023	LIVW01	GRFA01	LIVW01
985944	CIN051	MPL023	-	-	LIVW01
976098	CIN054	CMO044	-	-	LIVW01
1102474	CIN051	MPL024	-	-	-
1093909	CIN051	MPL024	-	-	-
1102472	COP015	MPL033	-	-	-
1103195	COP015	MPL033	-	-	-
1099940	COP015	MPL033	-	-	-
1099394	COP015	MPL033	-	-	-
1101110	COP015	MPL033	-	-	-
1101117	COP015	MPL033	-	-	-
1090183	COP015	MPL033	-	-	-
1090473	COP015	MPL033	-	-	-
1089912	COP015	MPL033	-	-	-
1089815	COP015	MPL033	-	-	-
1099437	COP015	MPL033	-	-	-
1093764	COP015	MPL033	-	-	-
976141	CIN054	MPL015	LIVW01	GRFA01	-
1093143	CIN051	MPL015	LIVW01	GRFA01	-
1094030	CIN053	MPL015	-	-	-
1093706	CIN054	MPL015	LIVW01	GRFA01	-
1093831	CIN051	MCV018	-	-	-
1093322	CIN054	CMO043	-	-	-
1094026	CIN054	MPL023	-	-	-
976498	CIN054	MPL023	-	-	-
986345	CIN054	MPL015	-	-	-
1099145	CIN054	MPL023	LIVW01	GRFA01	-

1099442	CIN054	MPL015	LIVW01	GRFA01	-
1099597	CIN054	MPL023	LIVW01	GRFA01	-
1100048	CIN044	CMO044	-	-	-
1089810	CIN051	MPL015	-	-	-
1099396	COP015	MCV061	-	-	-
1099995	COP015	MCV061	-	-	-
1099415	COP015	MCV061	-	-	-
1099753	COP015	MCV061	-	-	-
1099008	CIN047	MCV061	-	-	-
1103207	CIN047	MCV061	-	-	-
1103205	CIN054	CMO044	-	-	-

Gli *shapefile* contenenti i codici relativi alle superfici (strade e cortili), agli edifici ed alla vegetazione (prati, alberi ed aiuole) sono stati importati nel *software* ENVI-met dove sono stati utilizzati per sviluppare il *baseline scenario* coerentemente con quanto riportato in Tabella 23.

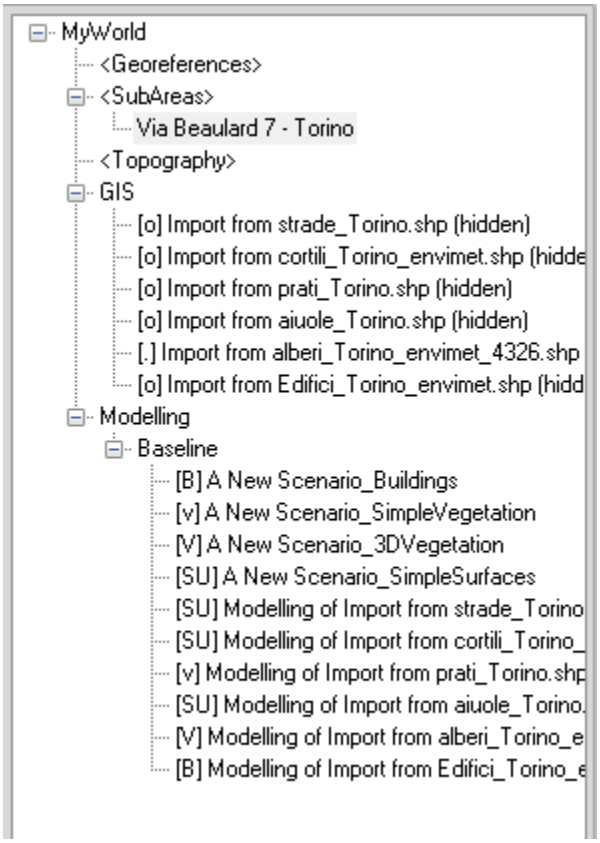


Figura 64. Modellazione dello scenario baseline in ENVI-met per l'area urbana selezionata di Torino

Anche per Torino, il modello ottenuto con l'applicazione del DEM è stato confrontato, in termini altimetrici, con i dati prodotti da Google Earth. Come già notato per Roma, si è visto che, nel modello ENVI-met, non solo le quote altimetriche assolute (i.e., sul livello del mare) differivano da quelle trovate in *Google Earth*, ma che anche le differenze di quota tra punti nella stessa area differivano dalle stesse differenze misurate in *Google Earth*. Tuttavia, le differenze di quota sono risultate essere contenute nell'ordine massimo di circa 10 m. Come già effettuato per Roma, li DEM è stato eliminato dal modello.

Al fine di ottenere un modello che restituisse *output* più precisi, la griglia è stata affinata passando 5m x 5m x 5m a 3m x 3m x 3m. Per fare in modo che il modello non restituisse errori è stata modificata la dimensione dell'area passando, nel caso di Torino, da 350 m x 510 m a 300 m x 411 m e con un numero di celle lungo l'asse z pari a 17 (Figura 65). Inoltre, sono state indicate 17 celle come celle vuote nel piano xy. Si è scelto, inoltre, di suddividere le griglie lungo l'asse z in cinque sotto-celle e di applicare un fattore telescopico del 30% che cominci da un'altezza superiore ai 33 m, cioè 2 metri sopra l'edificio più alto presente nel dominio di calcolo. Il modello è stato ispezionato in *Spaces* per verificarne la correttezza.

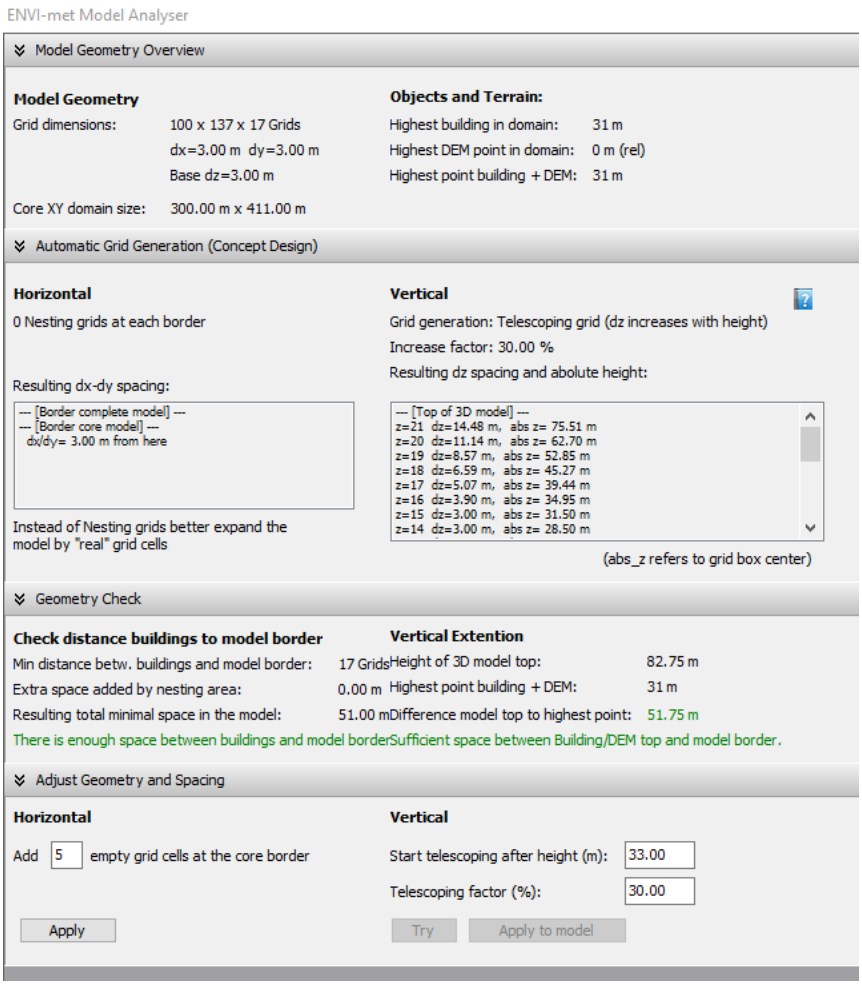


Figura 65. Definizione del modello ENVI-met per l'area urbana selezionata di Torino

Dopo la realizzazione del modello dello scenario *baseline*, i modelli degli scenari di mitigazione dell'isola di calore sono stati realizzati attraverso l'applicazione manuale delle tecnologie verdi d'involucro (i.e., *living wall* e *green façade*) sulle rispettive pareti di applicazione. Ad esempio, in Figura 66 è possibile osservare l'applicazione manuale di *living wall* per la realizzazione del modello dello scenario di mitigazione TO1.

Nei modelli sono stati poi inseriti i "*receptors*" al fine di verificare con maggiore precisione i dati meteorologici in particolari punti all'interno del dominio di calcolo. In particolare, nel modello di Torino sono stati inseriti 20 ricettori (Figura 67).

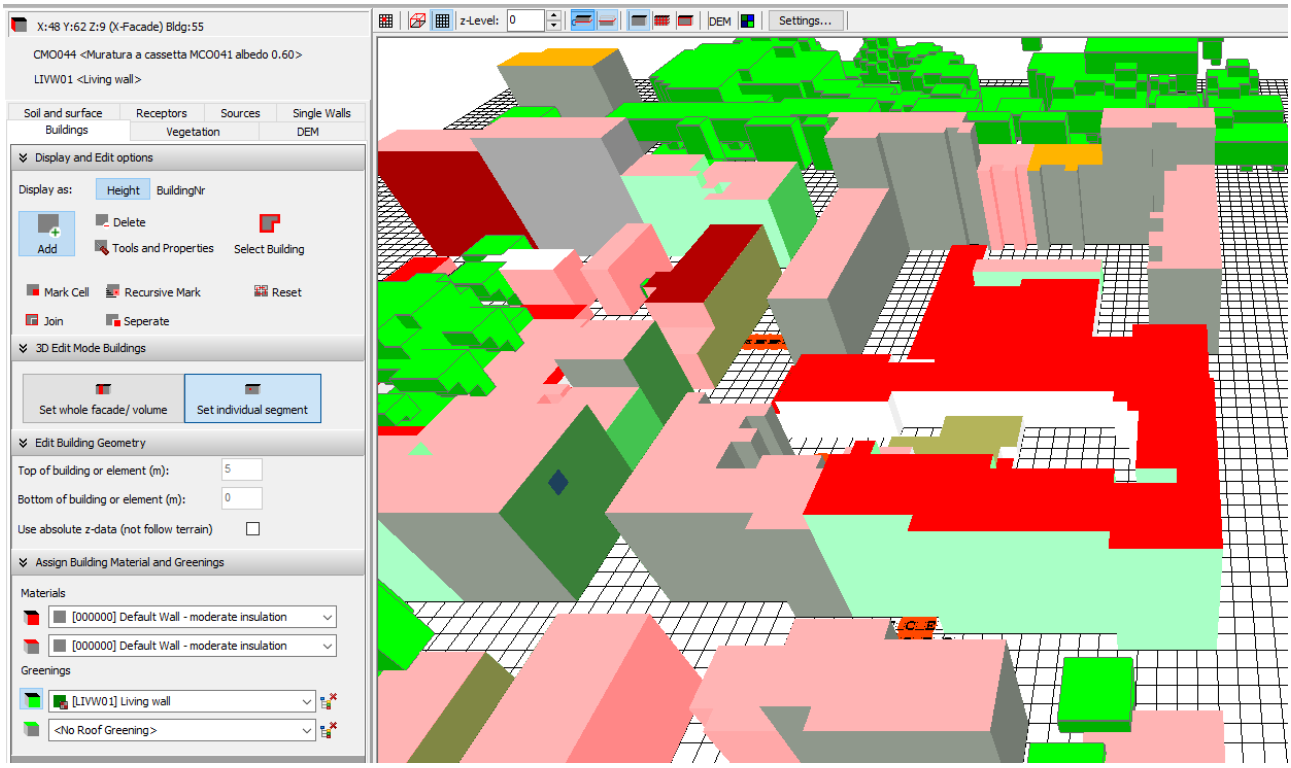


Figura 66. Applicazione manuale delle tecnologie verdi d'involucro per la realizzazione dei modelli degli scenari di mitigazione per l'area urbana selezionata di Torino, scenario TO1

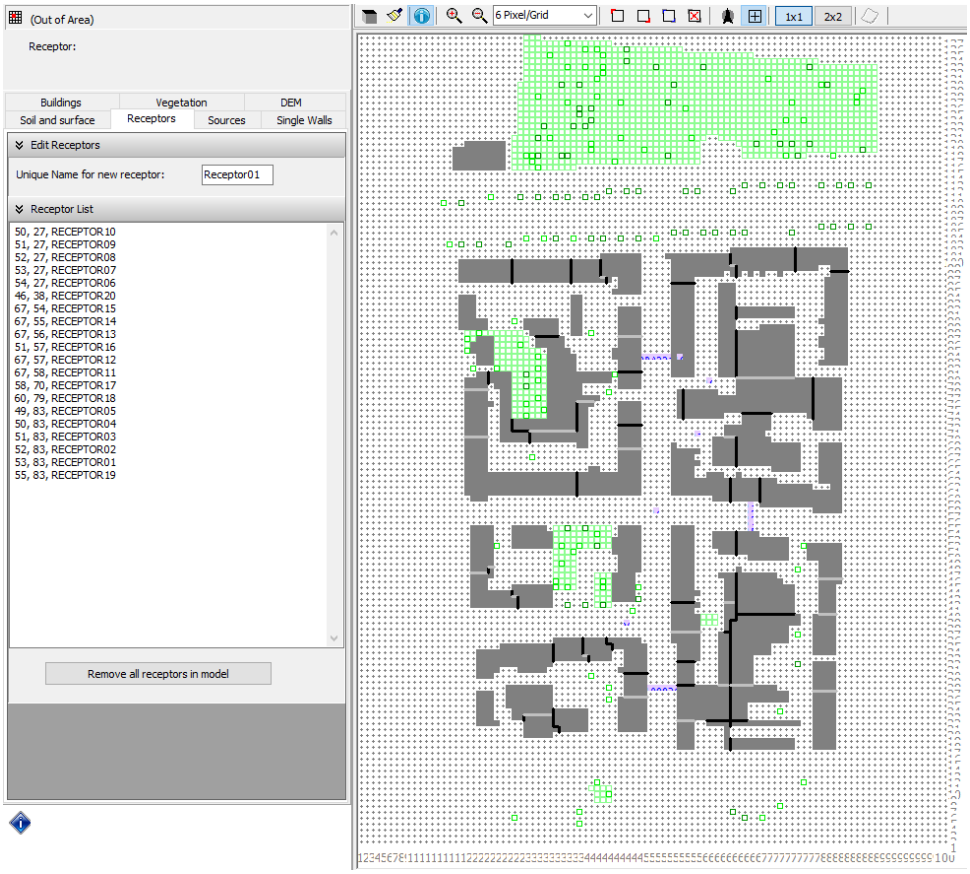


Figura 67. Indicazione dei *receptors* nel modello ENVI-met per l'area urbana selezionata di Torino

Di seguito sono riportate le immagini relative alla visualizzazione 3D degli scenari sviluppati Figura 63.

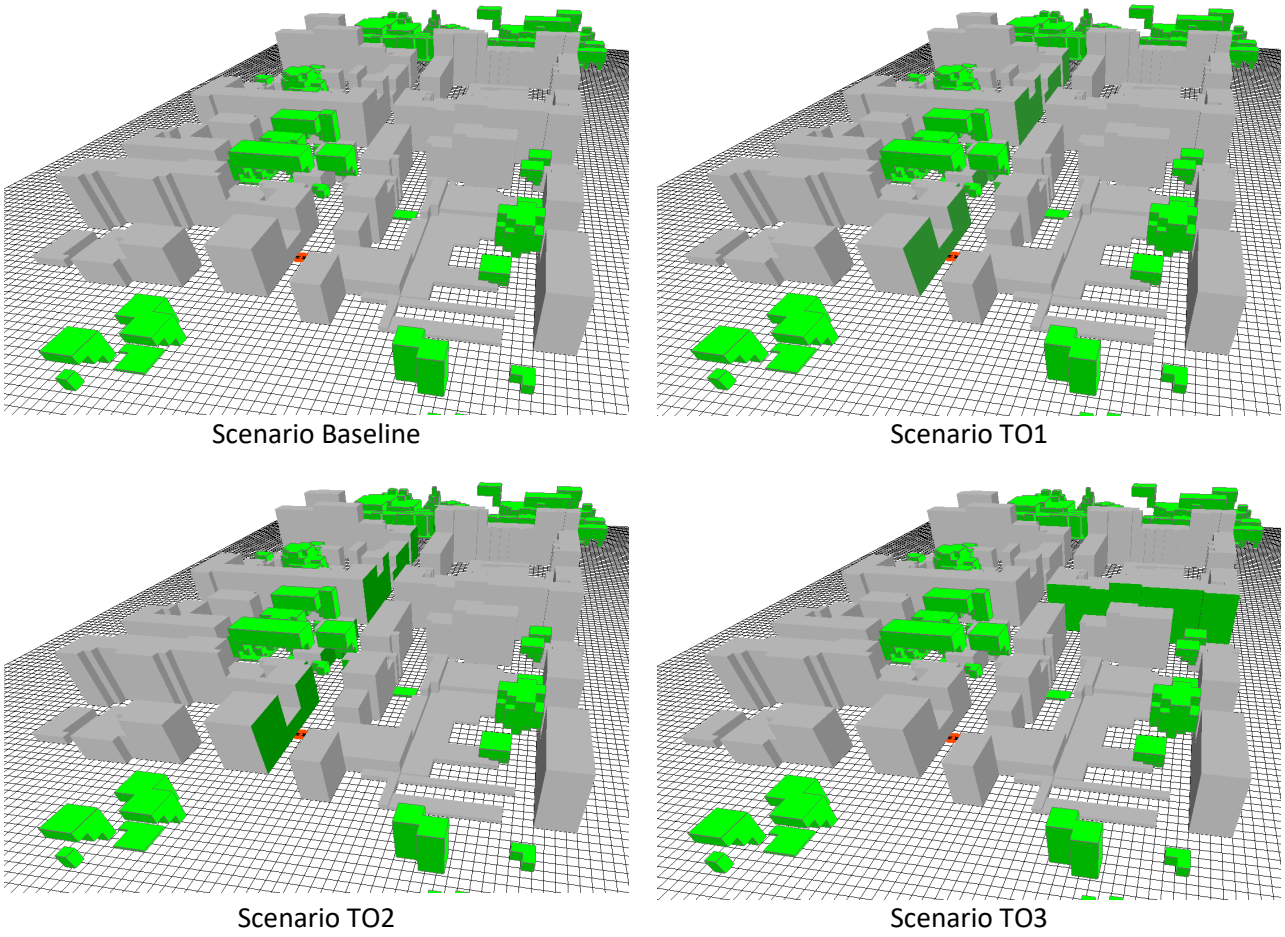


Figura 68. Visualizzazione 3D degli scenari del modello dell'area urbana selezionata di Torino

I quattro modelli sono stati forzati utilizzando come *input*, per temperatura, umidità relativa, velocità e direzione del vento, i dati meteorologici della stazione di Caselle Aeroporto. Per ottenere degli *output* della simulazione non legati alla fase di inizializzazione della simulazione stessa, per ciascuna delle 3 giornate significative (i.e., 19/01/2016, 27/07/2014 e 07/07/2015) è stata simulata anche la giornata precedente. Ogni simulazione è consistita quindi in 48 ore simulate e in particolare: 18 e 19 gennaio 2016 per le condizioni invernali, 26 e 27 luglio 2014 per le condizioni estive, 6 e 7 luglio 2015 per le condizioni di ondata di calore. Sono poi stati considerati solo i dati di *output* relativi alle 3 giornate significative scelte.

5.3 Milano

Per quel che riguarda gli scenari per l'area urbana di Milano, di seguito è riportata una tabella riassuntiva in cui sono stati indicati, per ciascuno degli scenari sviluppati, i codici relativi alle chiusure orizzontali e verticali di involucro e i codici relativi alle tecnologie verdi di involucro (Tabella 24).

Tabella 24 Scenari per il modello relativo all'area urbana di Milano

Codice identificativo dell'edificio	**Baseline scenario**		**Scenario MI1**	**Scenario MI2**	**Scenario MI3**		
	Codice ENVI-met chiusura orizzontale di copertura	**Codice ENVI-met chiusura verticale di involucro**	**Codice ENVI-met living wall verso via Bellinzaghi**	**Codice ENVI-met living wall verso via Bassi**	**Codice ENVI-met *living wall* verso via Bassi**	**Codice ENVI-met green roof**	
100825	CIN044	MPL025					
992774	CIN054	MPL015					
992810	CIN054	MPL015					
993142	CIN054	MPL015					
993279	CIN054	MPL015					
1003298	CIN054	MPL015					
1003333	CIN054	MPL015					
1003701	CIN054	MPL015					
1086201	CIN052	FCONT1					
1086318	CIN054	MPL014	LIVW01				
1086322	CIN044	MPL015					
1086371	CIN052	MPF011		LIVW01	LIVW01		
1086420	CIN055	F.CONT	LIVW01				
1086439	CIN044	MPL015					
1086498	CIN052	MPF011					
1086509	CIN052	MPF011					

1086520	CIN045	MCV031				
1086528	CIN045	MCV031				
1086529	CIN044	MPL015				
1086533	COP015	MPL015				
1086572	CIN054	MPL015				
1086602	CIN052	FCONT1				
1086616	CIN054	MPL012				
1086618	CIN052	MPF011				
1086626	CIN054	MPL015		LIVW01	LIVW01	
1086630	CIN022	MPL015				
1086647	CIN052	FCONT1				
1086763	CIN054	MPL015				
1086814	CIN022	MPL015				
1086858	CIN054	MPL015				
1086931	CIN054	MPL014	LIVW01	LIVW01	LIVW01	
1086951	CIN054	MPL015				
1086972	CIN052	MPF011				
1086987	CIN052	MPF011				
1086995	CIN043	MCV031				
1087029	CIN054	MPL015				
1087036	CIN054	MPL015	LIVW01			
1088041	CIN054	MPL015				
1092606	CIN044	MPL025	LIVW01			
1092733	CIN048	MPL032				
1092733	CIN044	MPL015				
1092946	CIN057	MPL032				
1093116	CIN044	MPL015				
1095860	CIN054	MPL015				
1095862	CIN044	MPL013		LIVW01	LIVW01	
1095871	CIN054	MPL015				
1095926	CIN046	MPL014		LIVW01	LIVW01	
1095949	CIN054	MPL015				
1095973	CIN054	MPL015		LIVW01	LIVW01	

1096013	CIN054	MPL015				
1096019	CIN054	MPL015				
1096088	CIN054	MPL015				
1096224	CIN054	MPL015				
1096226	CIN052	MPF011				
1096247	CIN022	MPL015	LIVW01			
1096266	CIN054	MPL015				
1096268	CIN052	MPF011				
1096273	CIN054	MPL015				
1096283	CIN054	MPL015				
1096284	CIN054	MPL015				
1096307	CIN054	MPL015		LIVW01	LIVW01	
1096317	CIN054	MPL015		LIVW01	LIVW01	
1096794	CIN054	MPL015				
1099192	CIN054	MPL015		LIVW01	LIVW01	
1100525	CIN044	MPL015	LIVW01	LIVW01	LIVW01	
1100670	CIN056	MCV018				
1100681	CIN048	MPL032				
1100778	CIN043	MPL015	LIVW01			
1100868	CIN044	MPL015	LIVW01			
1100954	CIN056	MCV018				
1100969	CIN048	MPL032				
1100997	CIN054	MPL015				
1101007	COP015	MPL015		LIVW01	LIVW01	
1101181	CIN054	MPL015	LIVW01			
1101188	CIN054	MPL015	LIVW01			
1101192	CIN044	MPL015				
1101195	COP015	MPL015				
1101206	CIN044	MPL015				
1101430	CIN054	MPL012	LIVW01			
1103158	CIN057	MPL032				
1103161	CIN048	MPL032				
1103178	CIN043	MPL015				

1103508	CIN054	MPL015				
1103514	CIN054	MPL015	LIVW01			
1101090	COP015	FCONT1		LIVW01	LIVW01	EXGR01

Gli *shapefile* contenenti i codici relativi alle superfici (strade e cortili), agli edifici ed alla vegetazione (prati, alberi ed aiuole) sono stati importati nel *software* ENVI-met dove sono stati utilizzati per sviluppare il *baseline scenario* coerentemente con quanto riportato in Tabella 24.

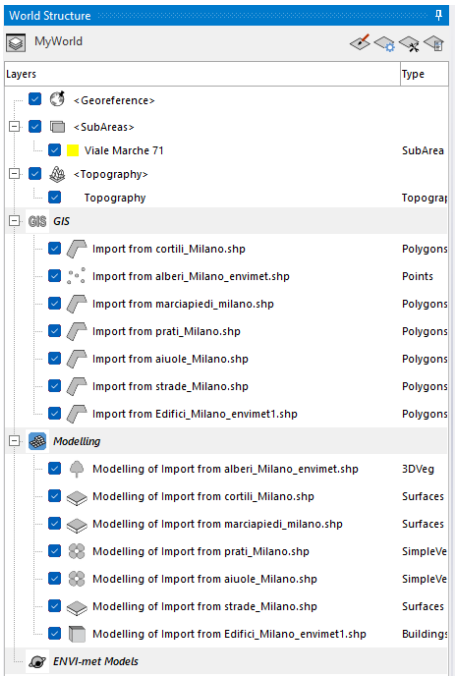


Figura 69. Modellazione dello scenario baseline in ENVI-met per l'area urbana selezionata di Milano

Come nei casi precedenti, il modello ottenuto con l'applicazione del DEM è stato confrontato, in termini altimetrici, con i dati prodotti da Google Earth. Come già notato sopra, si è visto che, nel modello ENVI-met, non solo le quote altimetriche assolute (i.e., sul livello del mare) differivano da quelle trovate in *Google Earth*, ma che anche le differenze di quota tra punti nella stessa area differivano dalle stesse differenze misurate in *Google Earth*. Tuttavia, le differenze di quota sono risultate essere contenute nell'ordine massimo di circa 10 m. Come già effettuato per Roma, li DEM è stato eliminato dal modello.
Al fine di ottenere un modello che restituisse *output* più precisi, la griglia è stata affinata passando 5m x 5m x 5m a 3m x 3m x 3m. La dimensione dell'area considerata per la simulazione è pari a 330 m x 231 m e con un numero di celle lungo l'asse z pari a 14 (Figura 70). Inoltre, sono state indicate 18 celle come celle vuote nel piano xy. Si è scelto, inoltre, di suddividere le griglie lungo l'asse z in cinque sotto-celle e di applicare un fattore telescopico del 30% che cominci da un'altezza superiore ai 27 m, cioè 2 metri sopra l'edificio più alto presente nel dominio di calcolo. Il modello è stato ispezionato in *Spaces* per verificarne la correttezza.

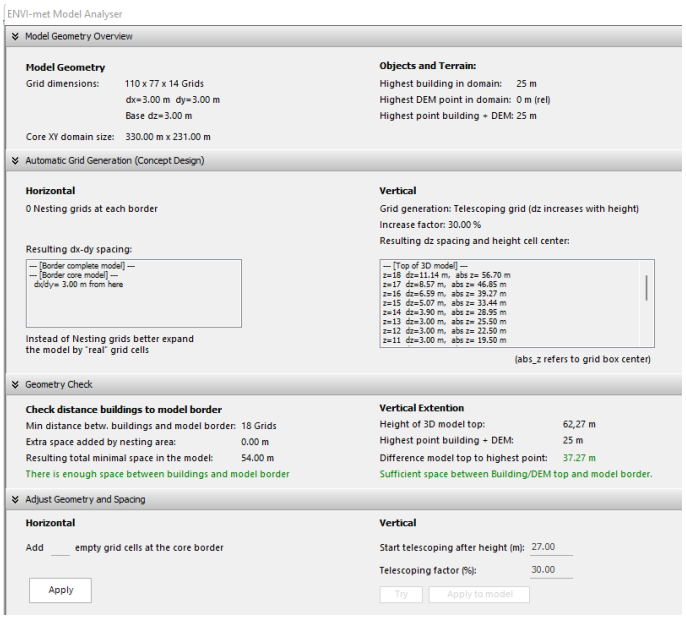


Figura 70. Definizione del modello ENVI-met per l'area urbana selezionata di Milano

Dopo la realizzazione del modello dello scenario *baseline*, i modelli degli scenari di mitigazione dell'isola di calore sono stati realizzati attraverso l'applicazione manuale delle tecnologie verdi d'involucro (i.e., *living wall*) sulle rispettive pareti di applicazione. Ad esempio, in Figura 71 è possibile osservare l'applicazione manuale di *living wall* per la realizzazione del modello dello scenario di mitigazione MI1.

Nei modelli sono stati poi inseriti i "*receptors*" al fine di verificare con maggiore precisione i dati meteorologici in particolari punti all'interno del dominio di calcolo. In particolare, nel modello di Torino sono stati inseriti 20 ricettori (Figura 72).

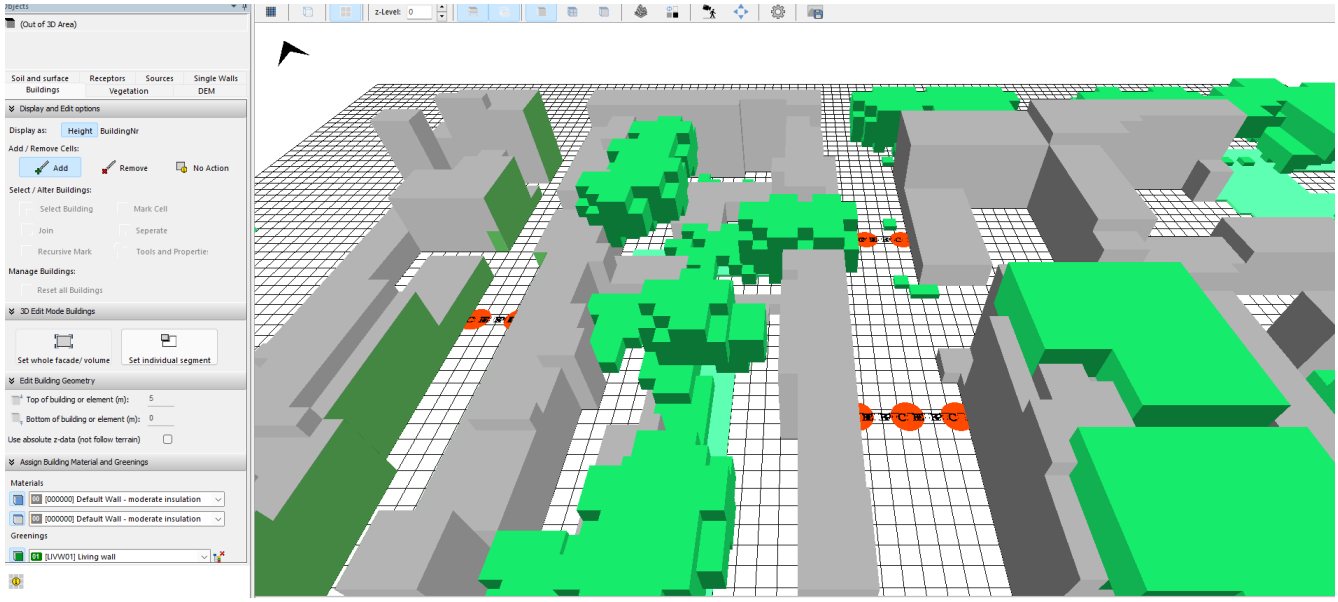


Figura 71. Applicazione manuale delle tecnologie verdi d'involucro per la realizzazione dei modelli degli scenari di mitigazione per l'area urbana selezionata di Milano, scenario MI1

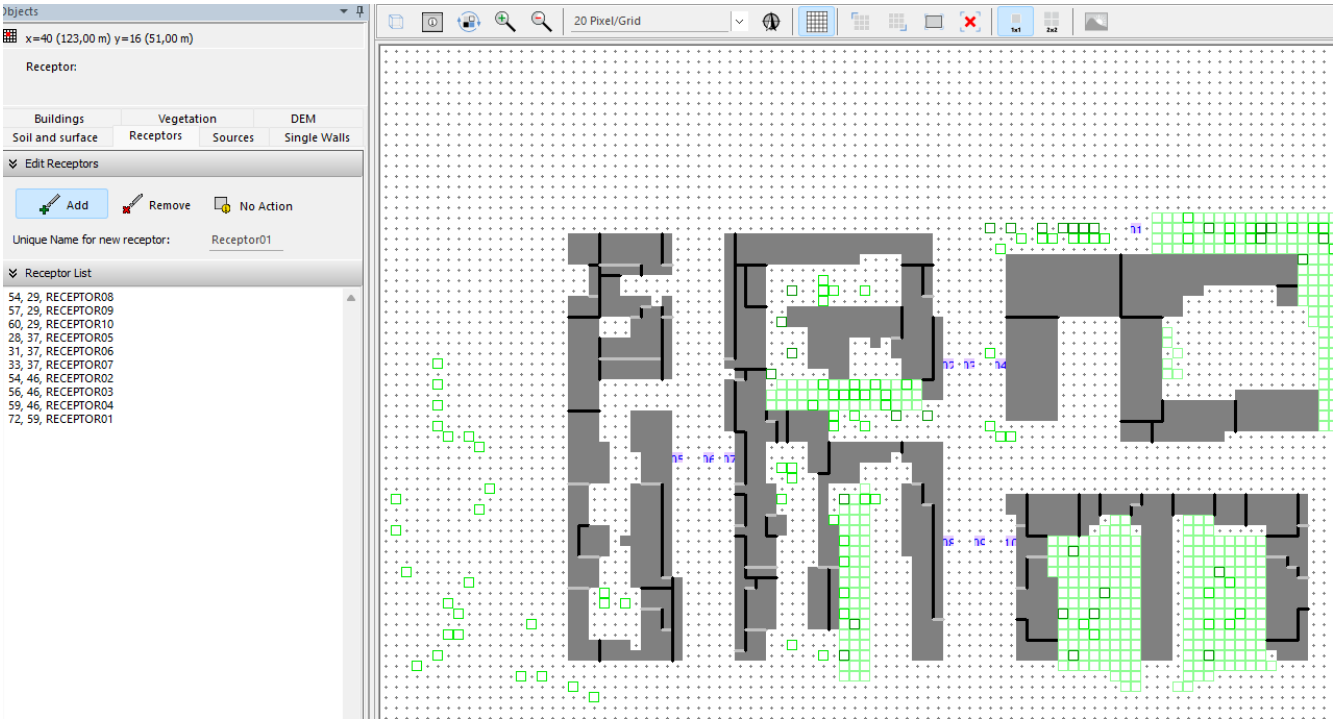


Figura 72. Indicazione dei *receptors* nel modello ENVI-met per l'area urbana selezionata di Milano

In Figura 73 sono riportate le immagini relative alla visualizzazione 3D degli scenari sviluppati.

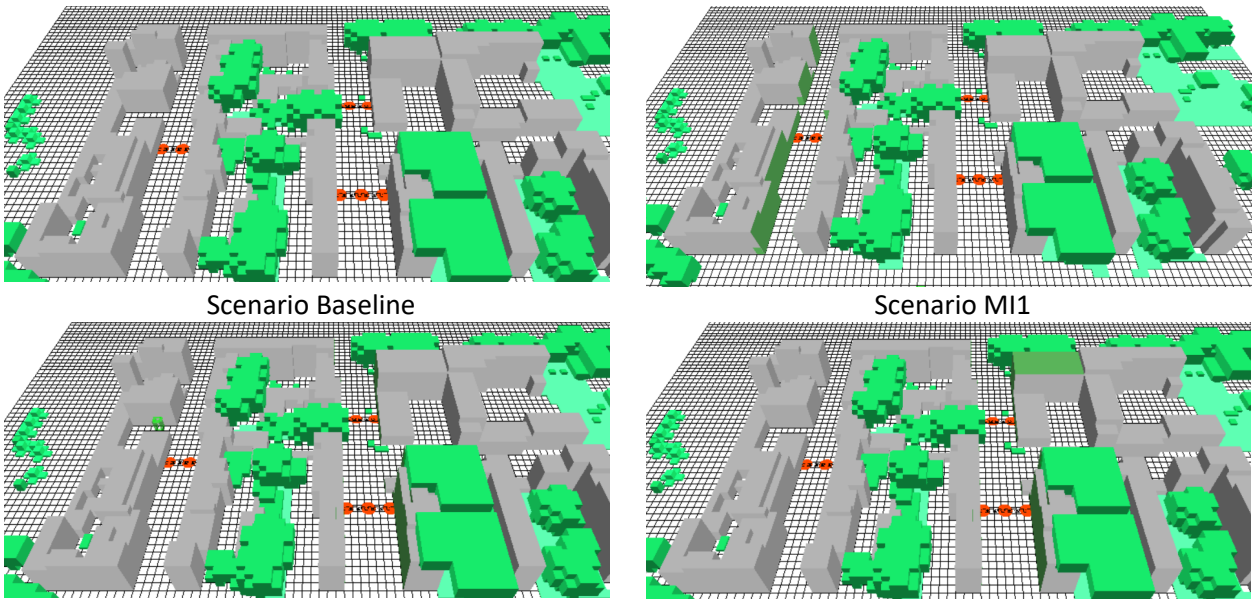


Figura 73. Visualizzazione 3D degli scenari del modello dell'area urbana selezionata di Milano

I quattro modelli sono stati forzati utilizzando come *input*, per temperatura, umidità relativa, velocità e direzione del vento, i dati meteorologici della stazione di Linate. Per ottenere degli *output* della simulazione non legati alla fase di inizializzazione della simulazione stessa, per ciascuna delle 3 giornate significative (i.e., 14/12/2018, 07/07/2015 e 19/06/2015) è stata simulata anche la giornata precedente. Ogni simulazione è consistita quindi in 48 ore simulate e in particolare: 13 e 14 dicembre 2018 per le condizioni invernali, 18 e 19 giugno 2015 per le

condizioni estive, 6 e 7 luglio 2015 per le condizioni di ondata di calore. Sono poi stati considerati i dati di *output* relativi alle sole 3 giornate significative scelte.

6 Definizione dei parametri sensibili

I cittadini residenti nelle aree urbane sono particolarmente vulnerabili all'esposizione agli inquinanti atmosferici [19]. In particolare, le città, a causa della loro diminuita ventosità a seguito dell'urbanizzazione, diventano luoghi in cui gli inquinanti atmosferici, non solo vengono prodotti, ad esempio a causa della attività antropiche o del traffico veicolare, ma ristagnano per tempi più lunghi rispetto alle aree rurali [20], [21]. Proprio per limitare i danni che gli inquinanti atmosferici provocano sulla salute umana, sono stati sviluppati standard di qualità dell'aria che definiscono le concentrazioni limite che le città devono rispettare. In Italia, la prima legge di questo tipo, detta legge antismog, risale al 1966 [22].

La maggior parte degli standard sulla qualità dell'aria fanno riferimento al PM_{10}, $PM_{2.5}$, NO_x e SO_x. Ne deriva che questi inquinanti sono, in linea di massima, controllati e tenuti, per quanto possibile, al di sotto dei valori soglia. Invece la concentrazione di anidride carbonica non è comunemente menzionata come inquinante che debba rispettare livelli di riferimento [23]. Tuttavia, la CO_2 è un inquinante atmosferico molto pericoloso per la salute umana soprattutto quando è presente in concentrazioni superiori al 2% [24]. In ambiente urbano, le numerose fonti di CO_2, come ad esempio il traffico veicolare, possono diventare un pericolo per i cittadini soprattutto in combinazione con l'isola di calore urbana. Infatti, l'UHI genera condizioni meteorologiche tali da far ristagnare la CO_2 e da renderla ancora più pericolosa. In questo contesto, le infrastrutture verdi sono delle valide soluzioni per ridurre la concentrazione di CO_2 nelle città [25]. Alcuni studi hanno mostrato che tetti e pareti verdi possono contribuire alla rimozione della CO_2 atmosferica [26]–[29]. Pertanto, nel presente studio sono stati considerati come parametri sensibili la temperatura dell'aria e la concentrazione di CO_2.

7 Output della modellazione ENVI-met

Per ciascuno dei tre casi di studio (i.e., zona urbana di Roma, Torino e Milano), sono stati analizzati i profili delle temperature registrate e simulate e per le tre giornate significative sono stati calcolati i Root Mean Square Error (RMSE) e i Mean Absolute Error (MAE). I valori di RMSE e MAE calcolati per i casi di studio e per le giornate significative sono stati confrontati con i valori di RMSE e MAE relativi a casi di studio presenti in letteratura e riportati in Figura 74 per verificare che i valori dei profili di temperatura ottenuti mediante le simulazioni ENVI-met fossero accettabili rispetto alla letteratura pubblicata.

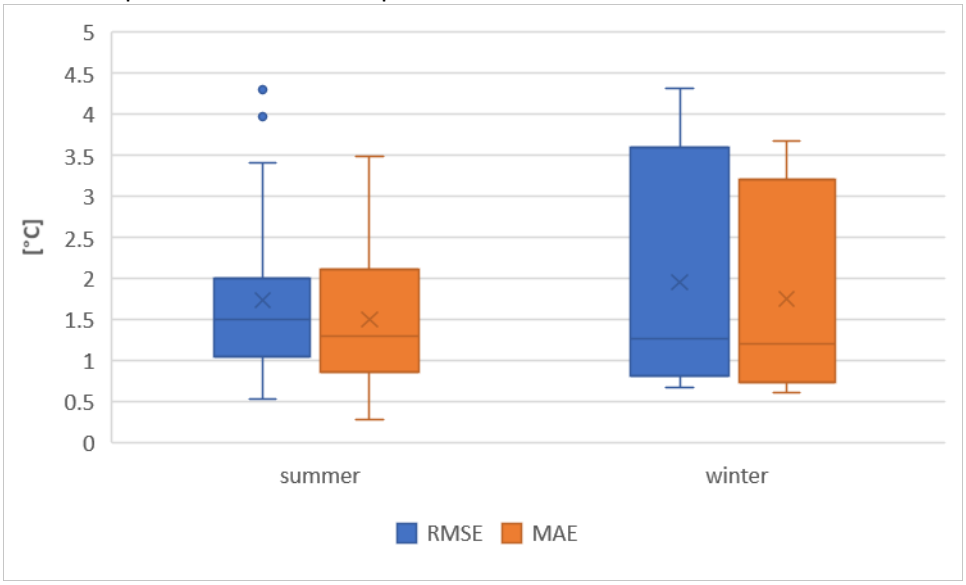


Figura 74. RMSE e MAE di studi presenti in letteratura. Figura elaborata dai dati forniti in Tsoka et al. (2019) [30]

Inoltre, sono stati confrontati anche i valori registrati e quelli simulati di velocità del vento, essendo la velocità del vento in ambito rurale un parametro altamente correlato con la velocità del vento in ambito urbano.
Dopo quest'analisi preliminare sono stati analizzati in dettaglio gli *output* delle simulazioni degli scenari di mitigazione e discussi di seguito.

7.1 Roma

7.1.1 Scenari *baseline*

Gli *output* delle simulazioni ENVI-met sono stati analizzati rispetto sia alle temperature registrate in ambiente urbano sia rispetto a quelle registrate in ambito rurale. Le temperature simulate sono state considerate ad un'altezza di 22.5 m sul livello del terreno, ovvero ad un'altezza molto simile rispetto a quella reale alla quale si trova la centralina da cui sono stati registrati i dati meteorologici utilizzati per il confronto delle temperature dell'aria. Di seguito sono riportate le temperature relative alle tre giornate significative (Figura 75-Figura 77).

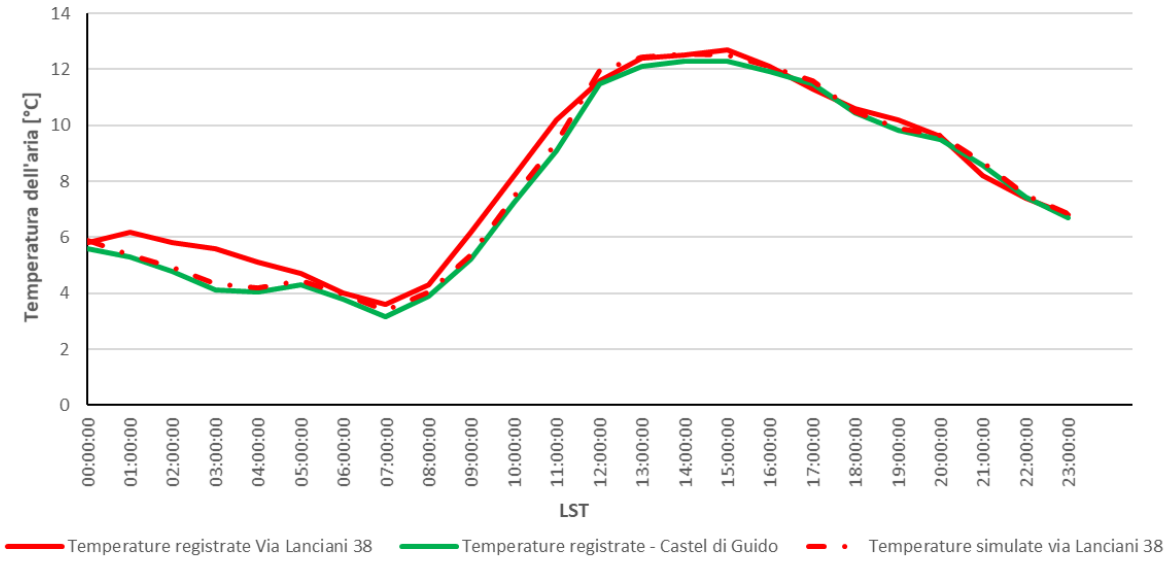


Figura 75. Temperature dell'aria registrate e simulate in Via Lanciani 38 relative al giorno tipico invernale (i.e., 18/02/2015)

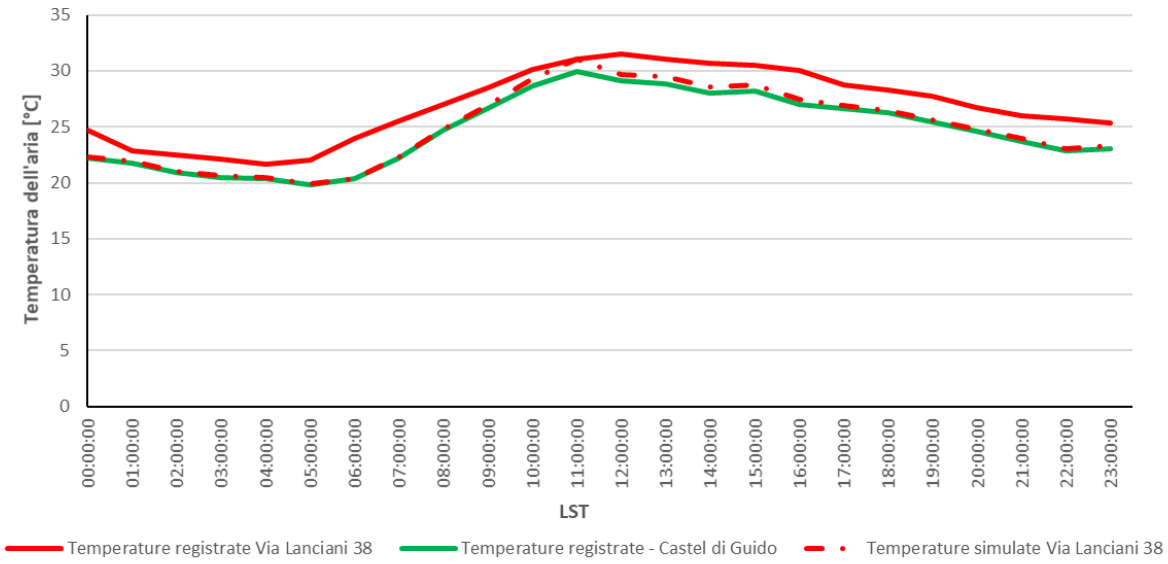


Figura 76. Temperature dell'aria registrate e simulate in Via Lanciani 38 relative al giorno tipico estivo (i.e., 01/07/2015)

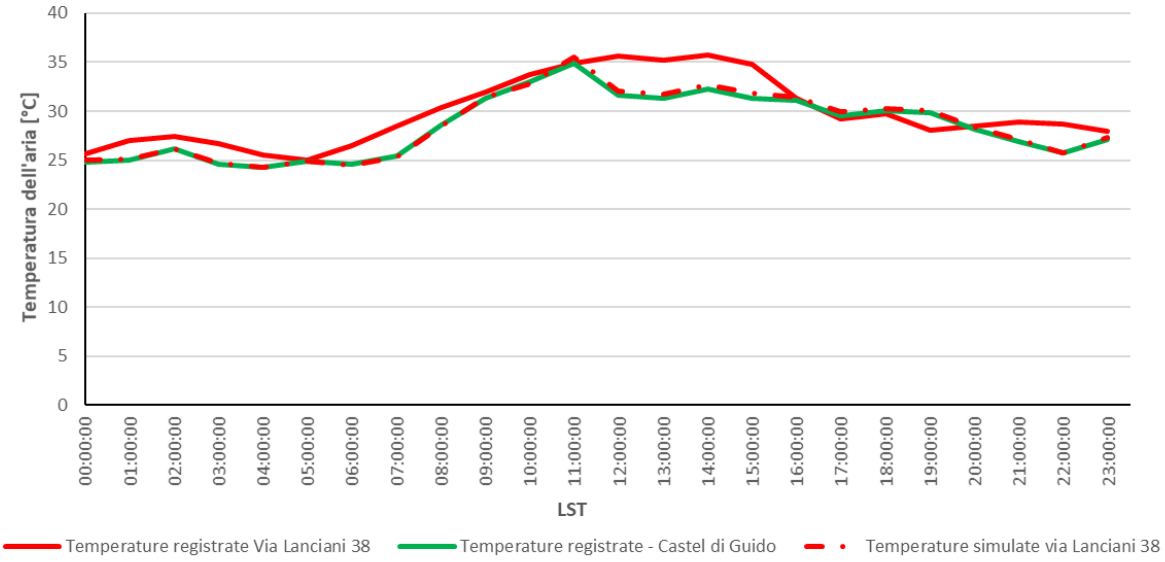


Figura 77. Temperature dell'aria registrate e simulate in Via Lanciani 38 relative al giorno tipico con ondata di calore (i.e., 22/07/2015)

È possibile notare come le temperature simulate dell'aria ricalchino l'andamento delle temperature rurali, usate per forzare il modello ENVI-met, nelle tre giornate tipiche. Inoltre, le figure dalla Figura 75 alla Figura 77 mostrano che le temperature massime simulate si avvicinano molto alle temperature massime registrate in via Lanciani 38. La Tabella 25 mostra per ciascuna delle tre giornate tipo gli errori calcolati tra le temperature registrate e le temperature simulate così come anche la variazione tra temperature massime registrate e simulate.

Tabella 25. Errori tra temperature registrate e temperature simulate relative a via Lanciani 38

	Mean Absolute Error (MAE)	Root Mean Square Error (RMSE)	ΔT temperatura massima
Giornata tipica invernale	0.38 °C	0.52 °C	0.1 °C [1]
Giornata tipica estiva	1.89 °C	2.02 °C	0.48 °C [2]
Giornata tipica con ondata di calore	1.60 °C	1.95 °C	0.19 °C [3]

[1] La temperatura massima registrata corrisponde alle ore 15.00 del 18/02/2015, mentre la temperatura massima simulata corrisponde alle ore 14.00. La differenza tra le temperature massime è pari a 0.1 °C, mentre alle ore 14.00 e alle ore 15.00 le differenze tra temperature registrate e simulate sono pari a 0.05 °C e 0.2 °C

[2] La temperatura massima registrata corrisponde alle ore 12.00 del 01/07/2015, mentre la temperatura massima simulata corrisponde alle ore 11.00. La differenza tra le temperature massime è pari a 0.48 °C, mentre alle ore 12.00 e alle ore 11.00 le differenze tra temperature registrate e simulate sono pari a 1.8 °C e 0 °C

[3] La temperatura massima registrata corrisponde alle ore 14.00 del 22/07/2015, mentre la temperatura massima simulata corrisponde alle ore 11.00. La differenza tra le temperature massime è pari a 0.19 °C, mentre alle ore 14.00 e alle ore 11.00 le differenze tra temperature registrate e simulate sono pari a 2.98 °C e -0.61 °C

I dati presenti in Tabella 25 sono stati confrontati con quelli riportati in Figura 74, ovvero quelli relativi ai valori RMSE e MAE calcolati da studi presenti in letteratura. Dal confronto risulta che per la giornata tipica invernale, i valori di RMSE e MAE del caso di studio di Roma sono inferiori rispetto a quelli trovati e rappresentati in Figura 74. I valori relativi al caso di studio di Roma risultano, per la giornata tipica invernale, più accurati rispetto ad altri studi di letteratura. Invece, per quel che riguarda i valori relativi alla giornata tipica estiva e tipica con ondata di calore, i valori trovati e riportati in Tabella 25 sono compatibili con quelli riportati in Figura 74. Pertanto, i dati simulati nel presente studio possono essere considerati attendibili almeno quanto quelli utilizzati in altri studi pubblicati che hanno utilizzato il *software* ENVI-met. Nel seguito, verranno investigati i dati di temperatura dell'aria all'altezza dei pedoni, ovvero a circa 2 m dal suolo. In particolare, verrà considerata la temperatura media a circa 2 m dal suolo per l'intero dominio investigato e verranno investigati alcuni punti particolari del dominio stesso.

Similmente sono stati confrontati i valori delle velocità del vento registrati sia in ambito urbano sia in ambito rurale con quelle simulate da ENVI-met (Figura 78-Figura 80) e sono stati calcolati i valori di MAE e RMSE (Tabella 26).

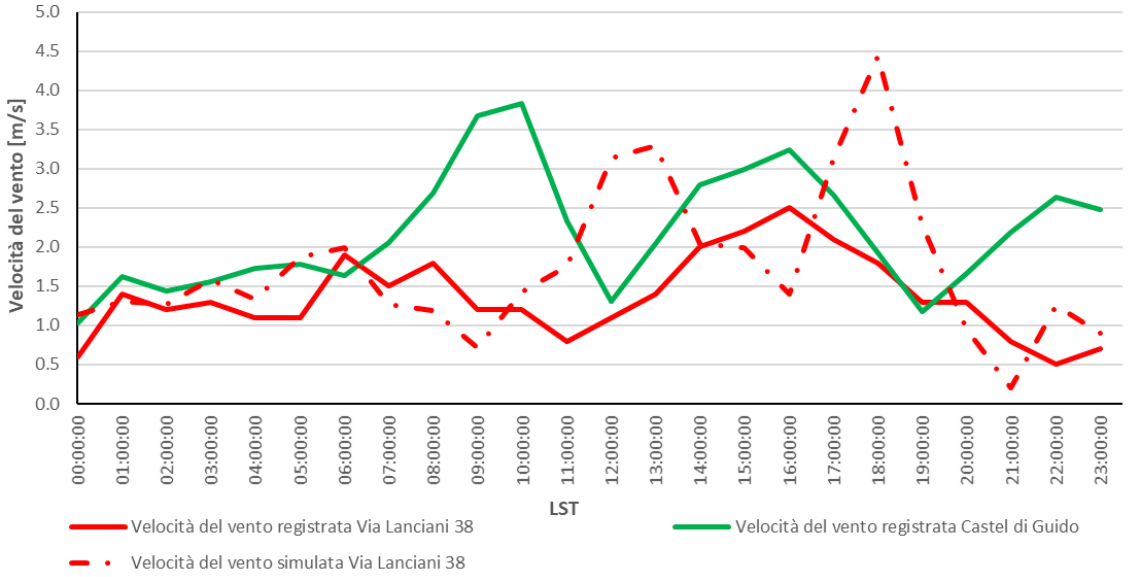


Figura 78. Velocità del vento registrate e simulate in Via Lanciani 38 relative al giorno tipico invernale (i.e., 18/02/2015)

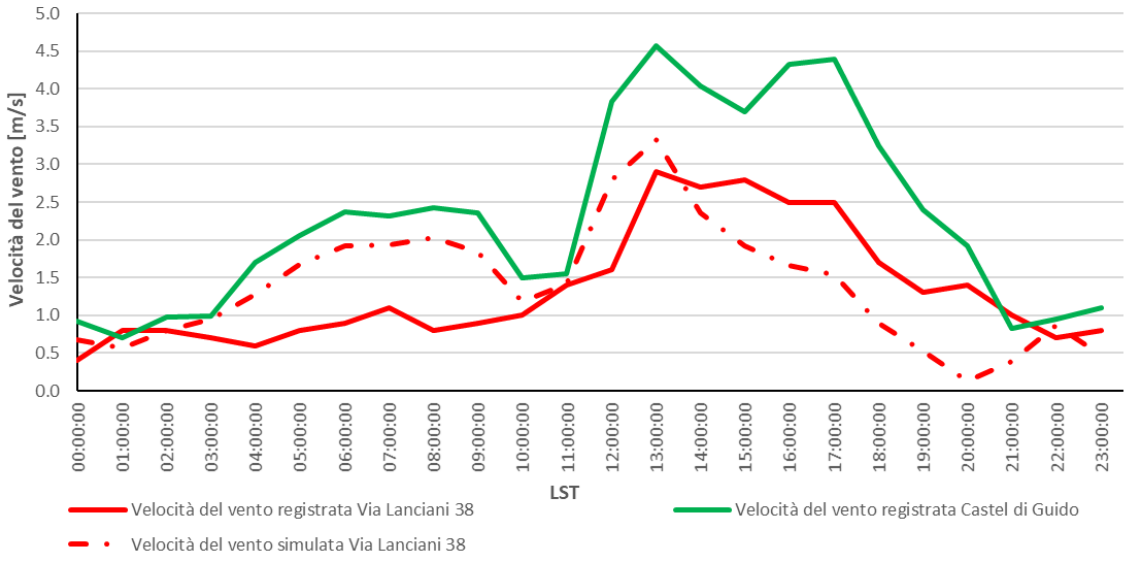


Figura 79. Velocità del vento registrate e simulate in Via Lanciani 38 relative al giorno tipico estivo (i.e., 01/07/2015)

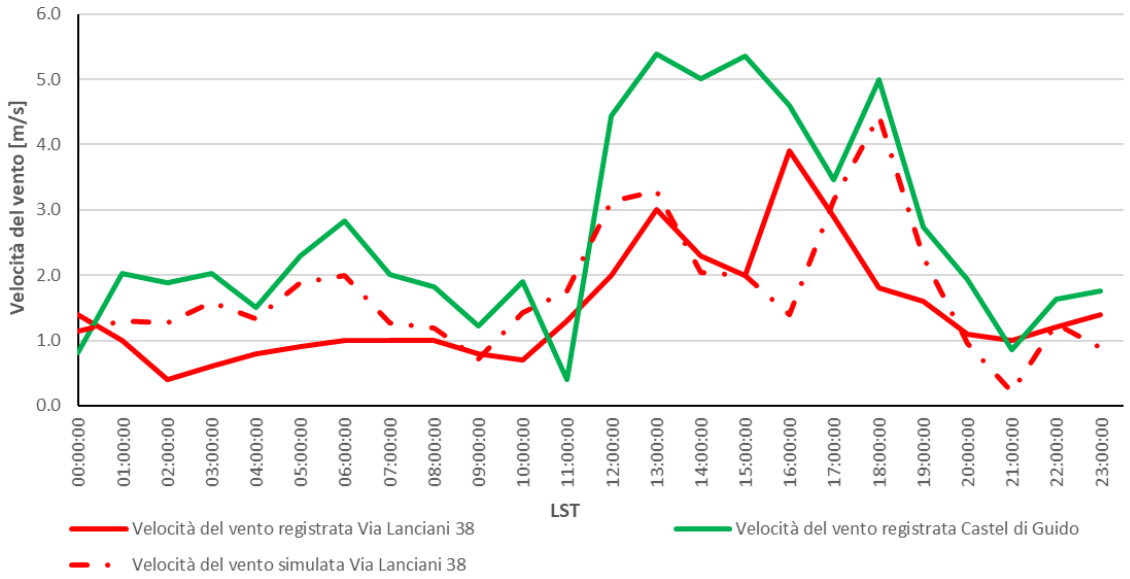


Figura 80. Velocità del vento registrate e simulate in Via Lanciani 38 relative al giorno tipico con conondata di calore (i.e., 22/07/2015)

Tabella 26. Errori tra velocità del vento registrate e temperature simulate relative a via Lanciani 38

	Mean Absolute Error (MAE)	Root Mean Square Error (RMSE)
Giornata tipica invernale	0.68 m/s	0.95 m/s
Giornata tipica estiva	0.63 m/s	0.74 m/s
Giornata tipica con ondata di calore	0.66 m/s	0.94 m/s

La Figura 78 mostra come il modello tendenzialmente sovrastimi la velocità del vento simulata per il giorno tipico invernale. Inoltre, è possibile notare come, durante le ore centrali del giorno, la velocità del vento simulata si discosti dai valori reali molto più che durante le ore notturne e del mattino. L'errore quadratico medio e l'errore medio assoluto sono, rispettivamente, 0.95 m/s e 0.68 m/s. Per quel che riguarda la giornata tipica estiva, la Figura 79 mostra che le velocità del vento simulate ricalcano bene le velocità del vento usate per forzare il modello ma meno bene quelle registrate in via Lanciani 38. L'errore quadratico medio e l'errore medio assoluto sono, rispettivamente, 0.74 m/s e 0.63 m/s. Per la giornata caratterizzata da ondata di calore, la Figura 80 mostra che i valori simulati ricalcano bene l'andamento delle velocità del vento relative alle ore notturne e mattutine della stazione rurale utilizzate per forzare il modello, mentre durante le ore centrali delle giornate ricalcano bene l'andamento della velocità del vento registrata dalla stazione meteorologica urbana di via Lanciani 38. L'errore quadratico medio e l'errore medio assoluto sono, rispettivamente, 0.94 m/s e 0.66 m/s (Tabella 26).
Infine, sono state valutate le variazioni assolute di CO_2 relative alle ore più calde di ciascuna delle giornate tipiche per ciascuno scenario rispetto allo scenario base. Non sono stati considerati altri inquinanti perché il *software* utilizzato li considera in relazioni alla presenza di fonti inquinanti come per esempio automobili. Tuttavia, nelle modellazioni fatte la presenza di traffico veicolare non è stata considerata perché, nello studio presentato, resta fondamentale l'effetto relativo agli scenari di mitigazione basati sull'installazione di pareti e tetti verdi.

7.1.2 Confronto tra le temperature dell'aria e CO_2 all'altezza dei pedoni relativi a scenari riferiti alla giornata tipica invernale (19/02/2015)

Le temperature puntuali relative a ciascuna cella del modello a 2.1 m dal suolo calcolate da ENVI-met sono state utilizzate per calcolare la temperatura media dell'intera area al netto degli edifici. Ovvero, per il calcolo della temperatura media dell'area urbana, sono stati eliminati i dati relativi agli ingombri degli edifici e con le rimanenti

temperature sono state calcolate le medie orarie per l'intera area di studio. Tale operazione è stata effettuata sia per lo scenario di controllo (i.e., *baseline* scenario) sia per i tre scenari di mitigazione (Figura 81).

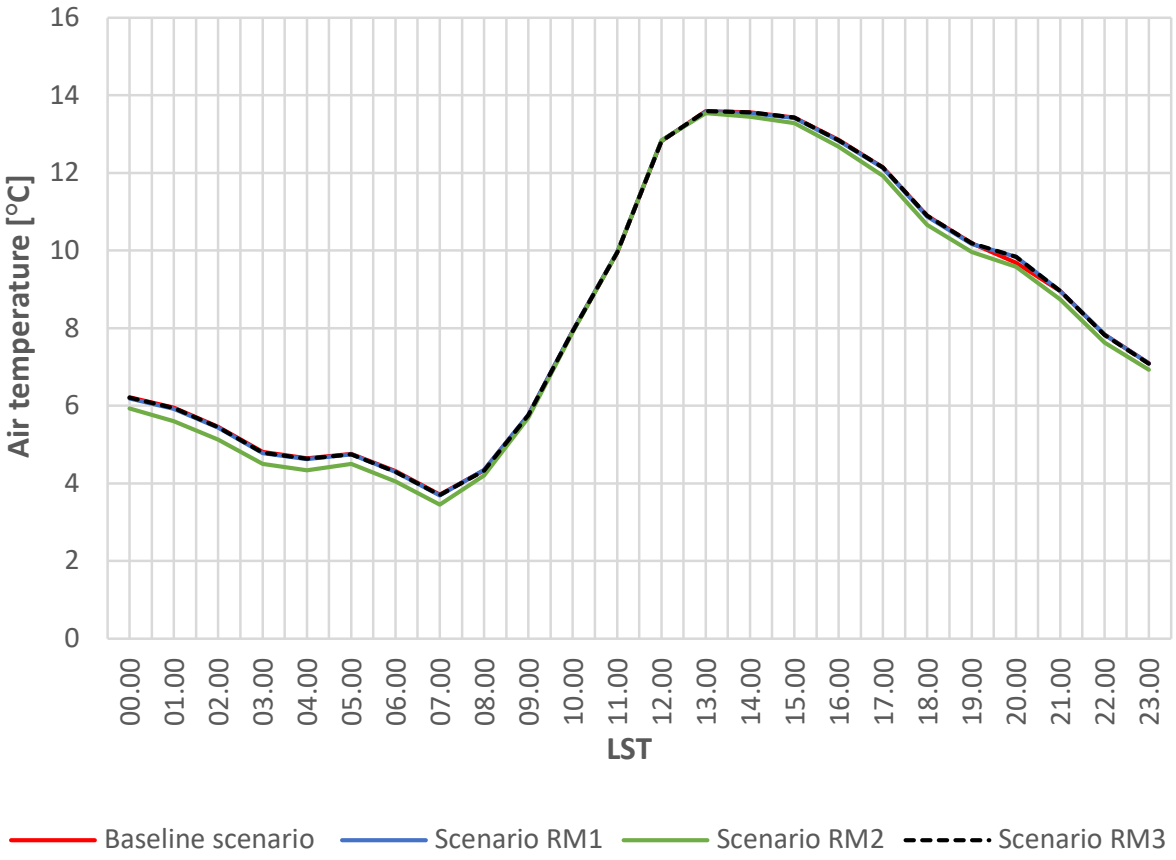


Figura 81. Temperature medie invernali dell'aria (i.e., a 2.1 m dal suolo) calcolate per l'intera area urbana selezionata (i.e., 19/02/2015)

Tabella 27 mostra l'effetto dell'applicazione degli scenari di mitigazione rispetto allo scenario di controllo per tutte le ore del giorno tipico invernale (i.e., 19/02/2015). È possibile notare che la maggiore mitigazione dell'isola di calore urbana la si può riscontrare in riferimento all'applicazione dello scenario RM2, ovvero lo scenario che prevede l'installazione di sia tetti verdi estensivi sia facciate verdi.

Tabella 27. Confronto tra le temperature dello scenario di controllo e gli scenari di mitigazione per il giorno tipico invernale (i.e., 19/02/2015)

Ora	$\Delta T_{Baseline-RM1}$	$\Delta T_{Baseline-RM2}$	$\Delta T_{Baseline-RM3}$
00.00	0.03	0.29	0.01
01.00	0.03	0.35	0.01
02.00	0.03	0.33	0.01
03.00	0.02	0.31	0.01
04.00	0.02	0.30	0.01
05.00	0.01	0.26	0.01
06.00	0.02	0.26	0.01
07.00	0.02	0.26	0.01

08.00	-0.01	0.13	0.01
09.00	-0.01	0.06	0.00
10.00	-0.01	0.02	0.00
11.00	-0.01	0.00	0.00
12.00	-0.01	-0.02	-0.01
13.00	0.01	0.04	0.00
14.00	0.02	0.11	0.00
15.00	0.02	0.15	0.00
16.00	0.01	0.18	0.00
17.00	0.01	0.22	0.01
18.00	0.02	0.24	0.01
19.00	0.02	0.23	0.01
20.00	-0.15	0.10	-0.16
21.00	0.01	0.22	0.01
22.00	0.00	0.21	0.01
23.00	0.00	0.17	0.01
Media	**0.00**	**0.18**	**0.00**

Mentre, per lo scenario RM1, che prevede l'applicazione di soli tetti verdi, è possibile notare che la maggiore mitigazione avviene durante le ore notturne e le prime ore del mattino (i.e., dalle ore 0.00 alle ore 07.00), durante le ore centrali della giornata (i.e., dalle ore 8.00 alle ore 12.00), si riscontra un aumento minimo della temperatura pari a 0.01 °C dovuto all'applicazione dei tetti verdi estensivi. Mentre dal primo pomeriggio (i.e., dalle ore 13.00) alle ore 21.00 si nota una diminuzione della temperatura che varia tra 0.01 e 0.02 °C, ad eccezione delle ore 20.00 che presentano un aumento anomalo della temperatura pari a 0.15 °C. Per l'intera giornata, tuttavia, la media delle temperature resta invariata rispetto allo scenario di controllo (Tabella 27).
La Figura 82 mostra la differenza tra la temperatura dell'aria all'altezza del pedone nel caso dello scenario RM1 e quello *baseline* alle ore 01.00 del 19/02/2015, ovvero nell'ora di maggiore mitigazione dell'isola di calore.

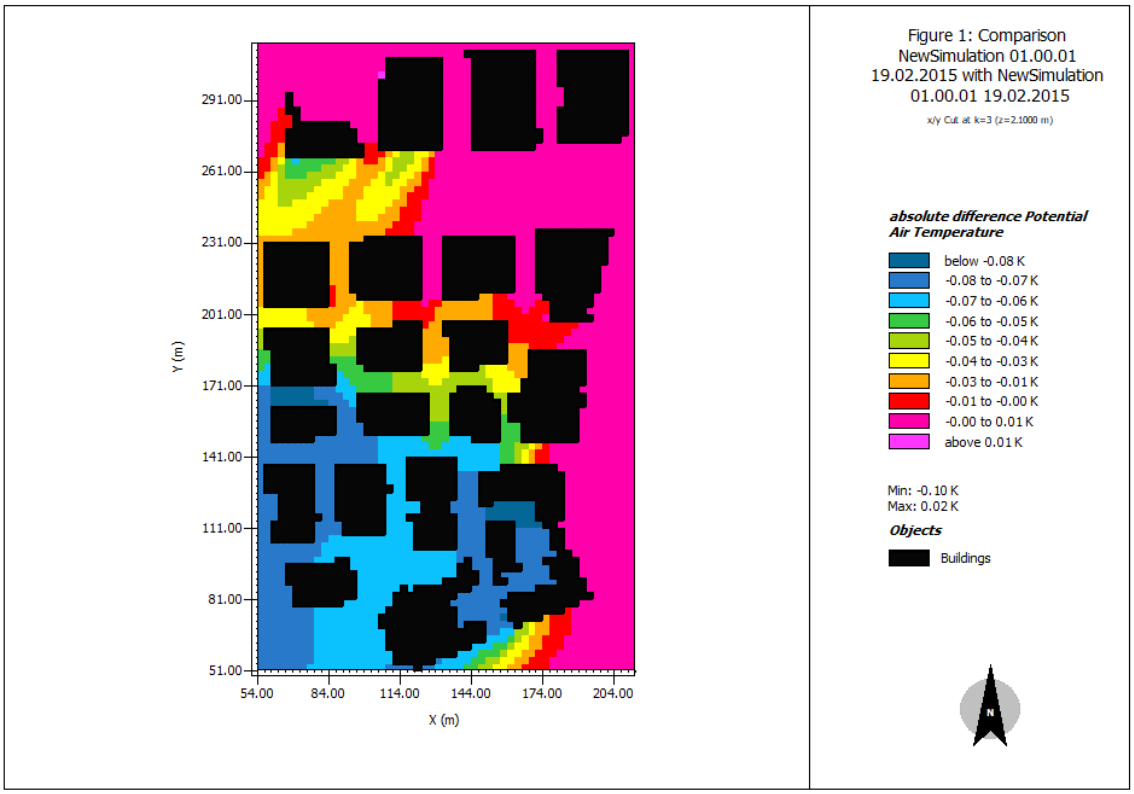


Figura 82. Confronto tra temperature dell'aria all'altezza del pedone (i.e., 2.1 m) tra scenario RM1 e scenario *baseline* ore 01.00 del 19/02/2015

È possibile notare come la differenza di temperatura sia maggiore nella parte a sud-est dell'area urbana investigata. Tale riduzione di temperatura è dovuta al vento che muove l'aria, che si è raffreddata per la presenza dei tetti verdi, verso il basso nella parte a sud-est. Inoltre, si può notare che la massima riduzione di temperatura, nonostante sia ben più alta rispetto alla media riportata in Tabella 27, sia, comunque, inferiore al decimo di grado. Questo significa che l'efficacia dell'installazione dei tetti verdi estensivi dipende fortemente da elementi di contento. Nel caso mostrato in Figura 82, l'altezza degli edifici in cui i tetti verdi sono installati determina la scarsa efficacia degli stessi nel mitigare la temperatura dell'aria all'altezza dei pedoni.

Per lo scenario RM2, che prevede l'installazione diffusa di tetti e facciate verdi, si può notare una diminuzione della temperatura che varia tra 0.04 e 0.30 °C per l'intero giorno, ad eccezione per le ore 12.00 durante le quali si nota un aumento della temperatura dell'aria pari a 0.02 °C. È interessante notare come la maggiore mitigazione dell'isola di calore urbana avvenga nelle ore in cui quest'ultima ha maggiore magnitudo, ovvero le prime ore del mattino.

La Figura 83 mostra le differenze di temperatura tra lo scenario RM2 e lo scenario *baseline* alle ore 01.00 del 19/02/2015. È possibile notare come, rispetto a quanto mostrato in Figura 82, l'installazione dello scenario RM2 produce una maggiore differenza di temperatura rispetto allo scenario base. Inoltre, la riduzione della temperatura risulta essere più uniforme rispetto allo scenario RM1. Pertanto, l'installazione di facciate verdi è in grado di mitigare in modo più omogeneo la temperatura urbana rispetto ai tetti verdi estensivi.

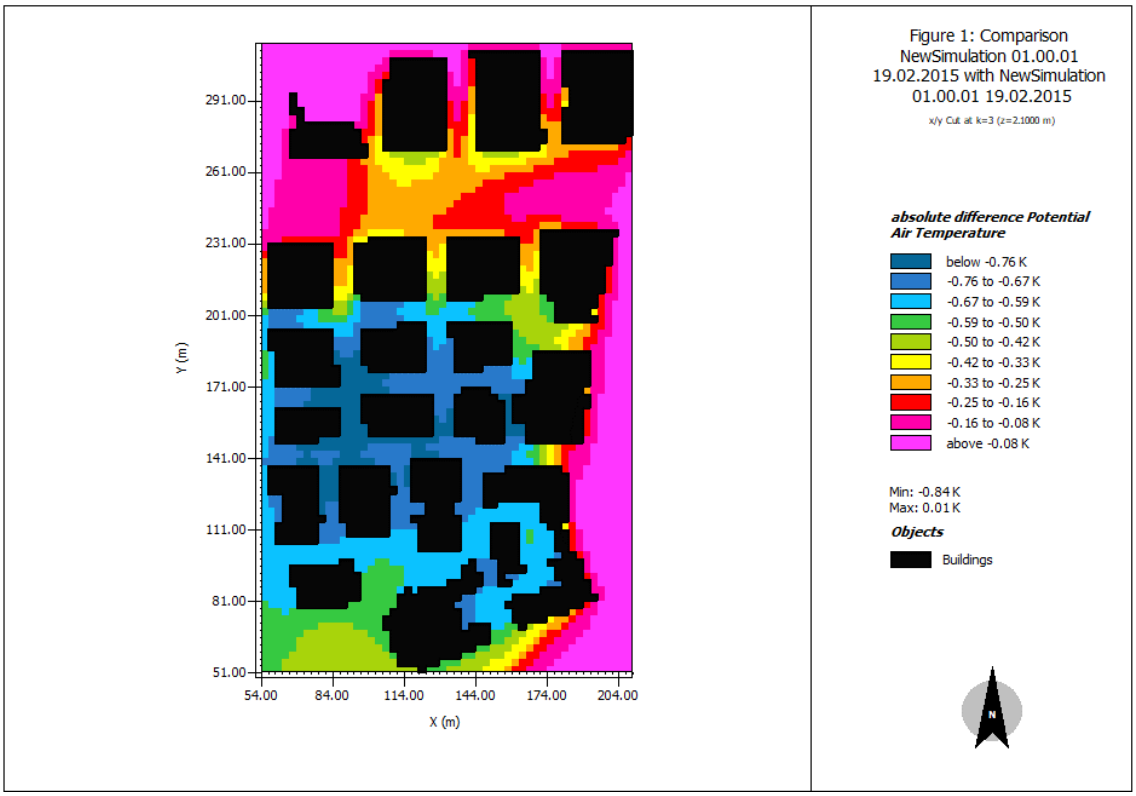


Figura 83. Confronto tra temperature dell'aria all'altezza del pedone (i.e., 2.1 m) tra scenario RM2 e scenario *baseline* ore 01.00 del 19/02/2015

Inoltre, la Figura 83 mostra come l'applicazione dello scenario RM2 riduca la temperatura dell'aria all'altezza dei pedoni anche fino a ~0.8 °C, soprattutto all'interno dei *canyon* urbani, risultando, pertanto, efficace nel mitigare l'isola di calore urbana.

Infine, è stato analizzato il caso dell'applicazione dello scenario RM3 che prevede l'installazione di facciate verdi su di un solo edificio. La Figura 81 mostra come in quest'ultimo caso le temperature dell'aria aderiscono perfettamente a quelle relative allo scenario *baseline*. In particolare, Tabella 27 mostra che le temperature dell'aria relative all'applicazione dello scenario RM3 differiscono dallo scenario di controllo di circa un centesimo di grado e che nell'arco dell'intera giornata la differenza media rispetto allo scenario di controllo è nulla.

La Figura 84 mostra in modo ancora più evidente come l'installazione di facciate verdi possa mitigare le temperature urbane all'altezza dei pedoni nelle immediate vicinanze della facciata verde stessa, ma che non mitighi l'isola di calore urbana in punti più distanti. Inoltre, nel caso in esame, si può notare come l'installazione di facciate verdi su un singolo edificio possa ridurre la temperatura dell'aria di massimo ~0.2 °C, risultando, quindi, poco efficace nel mitigare l'isola di calore urbana.

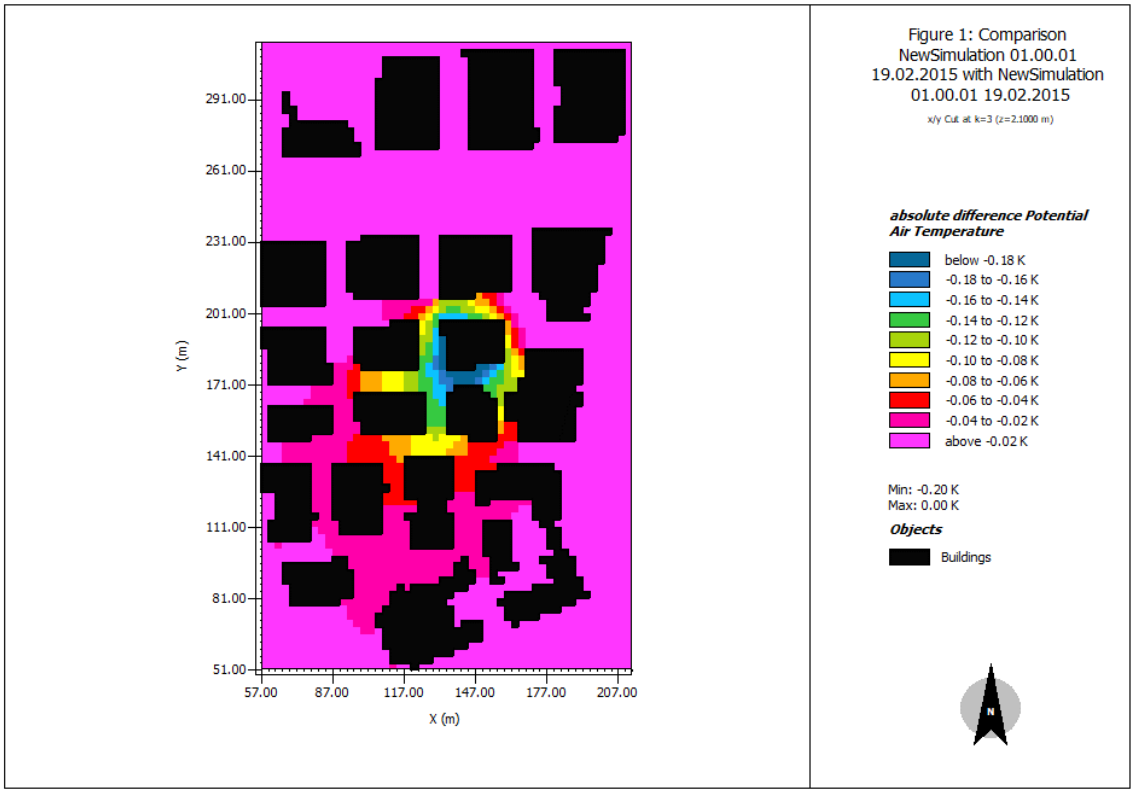


Figura 84. Confronto tra temperature dell'aria all'altezza del pedone (i.e., 2.1 m) tra scenario RM3 e scenario *baseline* ore 01.00 del 19/02/2015

In sintesi, l'applicazione dei tre scenari di mitigazione ha mostrato che:
- l'applicazione isolata di pareti verdi su un edificio (i.e., scenario RM3) ha effetti poco significativi sulla mitigazione dell'isola di calore urbana;
- l'effetto dell'installazione dei tetti verdi estensivi (i.e., scenario RM1) è solo in parte misurabile (i.e., il massimo valore di mitigazione media ottenuto è di 0.03 °C). Questo risultato può essere spiegato dal fatto che, nel caso di studio in questione, i tetti verdi sono installati su edifici di altezza media pari a 20 m. Tale risultato è anche in accordo con i risultati trovati in letteratura scientifica, i quali hanno mostrato come l'effetto dell'installazione dei tetti verdi risulti impercepibile all'altezza del pedone quando questi sono installati su edifici alti [6];
- la maggiore mitigazione è raggiunta quando vengono installati in modo combinato tetti verdi e facciate verdi (i.e., scenario RM2). In particolare, si è osservato che la massima mitigazione media raggiunge ~0.4 °C e che in media l'isola di calore è mitigata di 0.2 °C. Tali risultati vanno però maggiormente riferiti all'applicazione di facciate verdi. Infatti, nonostante non si possa affermare che l'applicazione di facciate verdi e tetti verdi estensivi abbia un effetto additivo, è possibile invece notare come sia esiguo il contributo della sola installazione di tetti verdi estensivi (i.e., scenario RM1). Pertanto, si può dedurre che l'applicazione di facciate verdi, in questa particolare configurazione urbana, possa contribuire maggiormente alla mitigazione dell'isola di calore urbana.

È stata valutata la variazione di CO_2 degli scenari di mitigazione relativi al 19/02/2015 alle ore 13.00, ovvero all'ora in cui la temperatura è massima poiché la combinazione tra inquinanti e temperatura può determinare i maggiori effetti sulla salute umana, rispetto allo scenario base.
La Figura 85 mostra la concentrazione del biossido di carbonio ad altezza pedonale relativo alle ore 13.00 e allo scenario base.

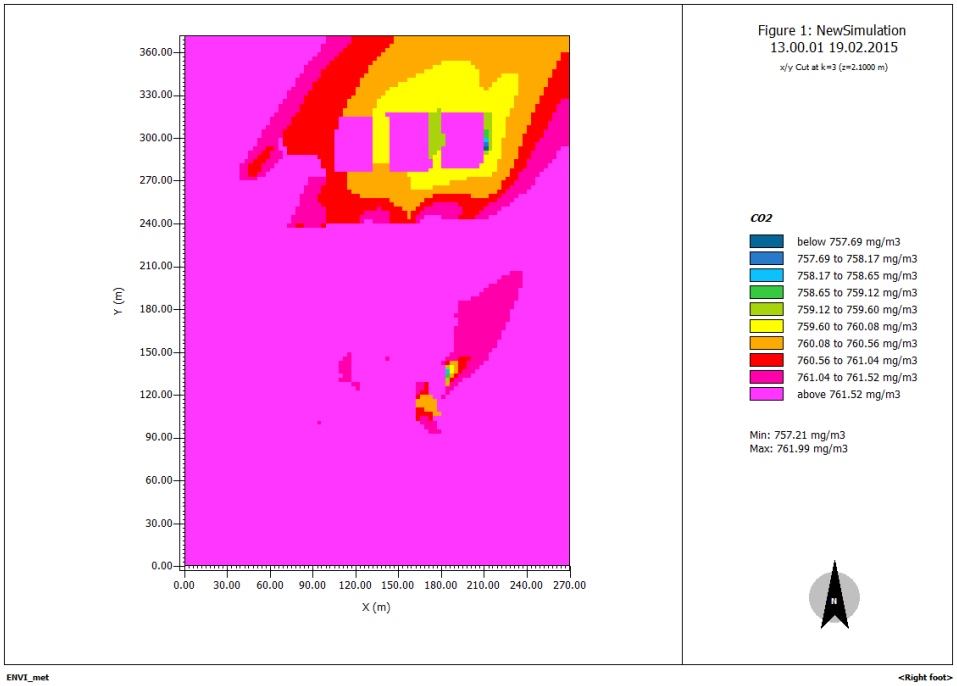


Figura 85. Concentrazione di CO_2 (mg/m^3) dell'aria all'altezza del pedone (i.e., 2.1 m) scenario *baseline* ore 13.00 del 19/02/2015

La concentrazione di CO_2 nell'intera area varia tra circa 757 e 762 mg/m^3. L'applicazione dello scenario di mitigazione RM1 dà origine ad una variazione esigua della concentrazione di biossido carbonio che raggiunge, al massimo, 0.02 mg/m^3 (Figura 86). Tale variazione equivale a circa il 0.003%. Pertanto, si può affermare che l'applicazione dello scenario RM1 non abbia nessun effetto sulla concentrazione di CO_2.

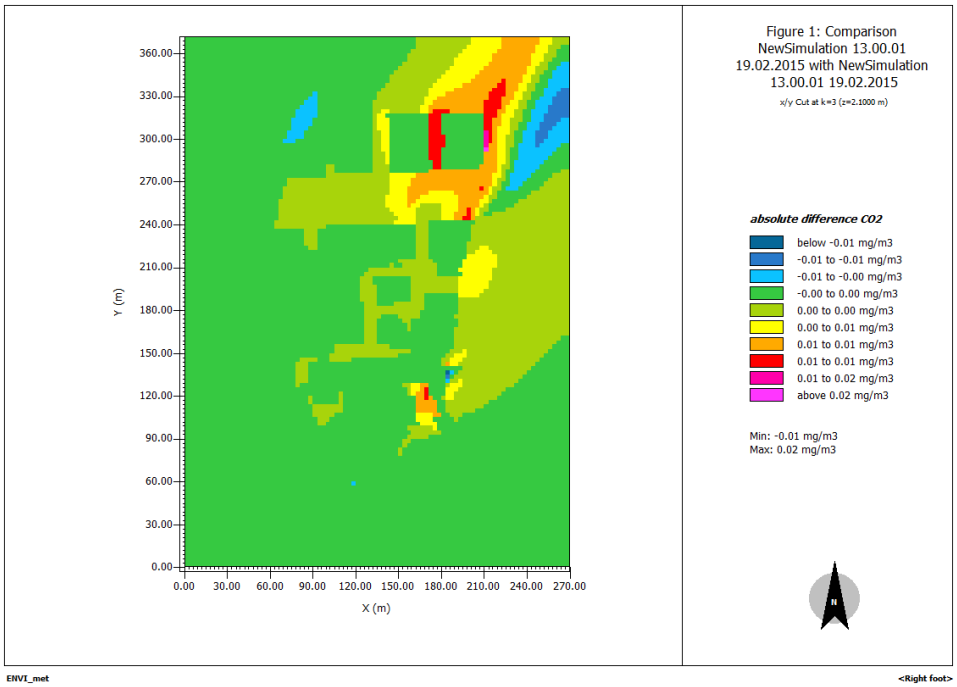


Figura 86. Confronto tra concentrazione di CO_2 (mg/m^3) dell'aria all'altezza del pedone (i.e., 2.1 m) tra scenario *baseline* e scenario RM1 ore 13.00 del 19/02/2015

Similmente è stata confrontata anche la concentrazione della CO_2 relativa agli scenari RM2 e RM3 (Figura 87 e Figura 88).

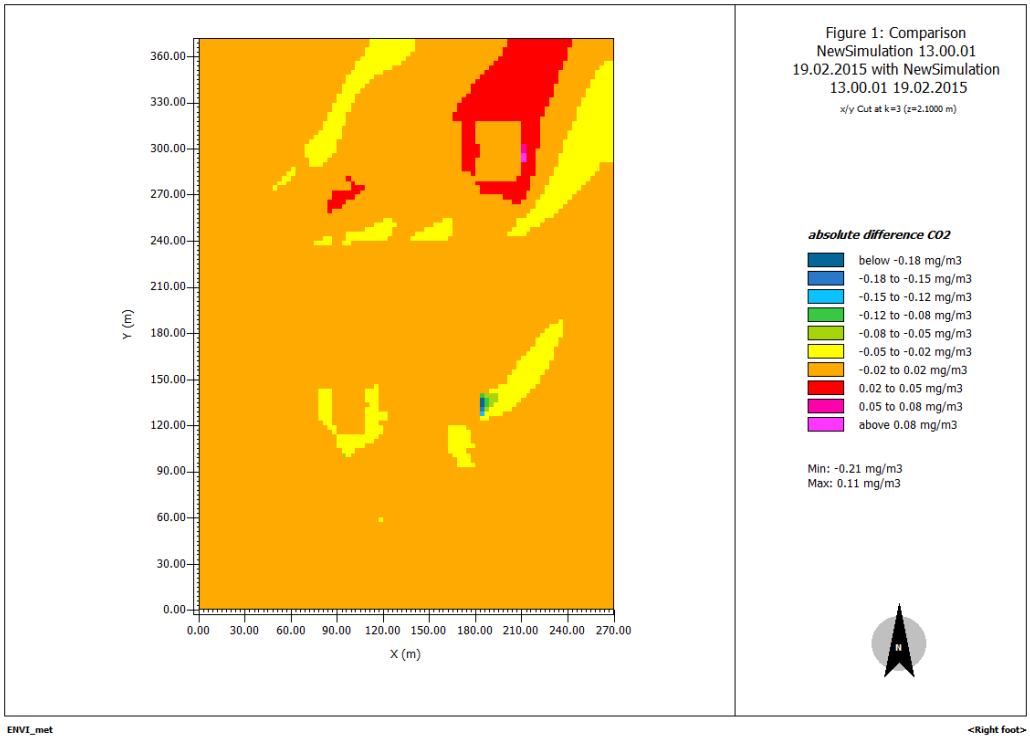


Figura 87. Confronto tra concentrazione di CO_2 (mg/m^3) dell'aria all'altezza del pedone (i.e., 2.1 m) tra scenario *baseline* e scenario RM2 ore 13.00 del 19/02/2015

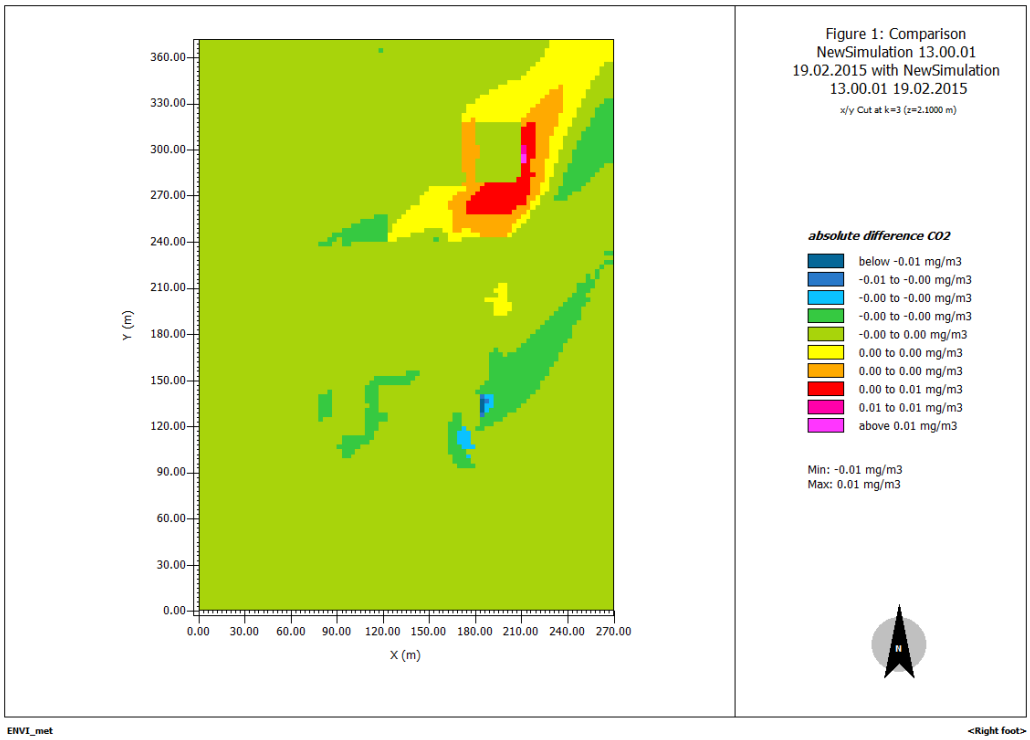


Figura 88. Confronto tra concentrazione di CO_2 (mg/m^3) dell'aria all'altezza del pedone (i.e., 2.1 m) tra scenario *baseline* e scenario RM3 ore 13.00 del 19/02/2015

La Figura 87 e la Figura 88 mostrano il confronto della concentrazione di CO_2 tra lo scenario di riferimento e gli scenari RM2 e RM3. È interessante notare che nel caso dello scenario RM3 la variazione di concentrazione di biossido di carbonio sia nulla, e nel caso dello scenario RM2 la variazione massima sia pari a circa 0.2 mg/m^3. In entrambi i casi i valori massimi di mitigazione della concentrazione della CO_2 sono raggiunti in pochi punti, per lo più nella parte nord-est dell'area urbana selezionata. Questo risultato può essere principalmente spiegato dalla direzione e velocità del vento nell'area in esame. In tutti e tre i casi di scenario di mitigazione, inoltre, le variazioni di CO_2 sono pressocché nulle e pertanto i tetti e le pareti verdi risultano essere inefficaci in tal senso.

7.1.3 Confronto tra le temperature dell'aria e CO_2 all'altezza dei pedoni relativi a scenari riferiti alla giornata tipica estiva (01/07/2015)

Le temperature puntuali dell'aria relative per ogni cella del modello e ad un'altezza di 2.1 m dal suolo sono state calcolate in ENVI-met e utilizzate per calcolare la media dell'intera area urbana oggetto di studio per le diverse ore del tipico giorno estivo, ovvero l'1/7/2015. La Figura 89 mostra come le temperature relative agli scenari di mitigazione ricalchino fedelmente l'andamento delle temperature dello scenario di controllo (i.e., scenario *baseline*) ad eccezione dello scenario RM2 che se ne discosta soprattutto durante le prime ore del mattino e dal pomeriggio fino a sera.

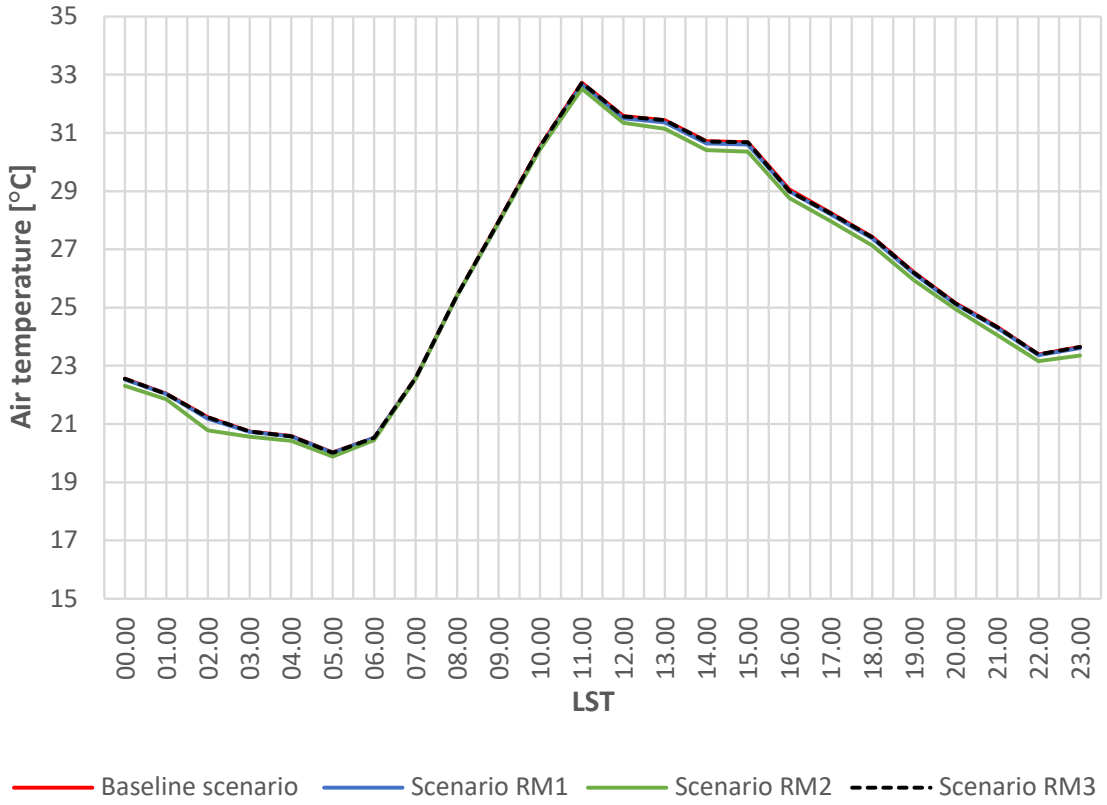


Figura 89. Temperature medie estive dell'aria (i.e., a 2.1 m dal suolo) calcolate per l'intera area urbana selezionata per il giorno tipico estivo (i.e., 01/07/2015)

La Tabella 28 mostra gli effetti della mitigazione dell'isola di calore urbana a seguito dell'applicazione dei tre scenari di mitigazione.

Tabella 28. Confronto tra le temperature dello scenario di controllo e gli scenari di mitigazione per il giorno tipico estivo (i.e., 01/07/2015)

Ora	$\Delta T_{Baseline-RM1}$	$\Delta T_{Baseline-RM2}$	$\Delta T_{Baseline-RM3}$
00.00	0.03	0.25	0.01
01.00	0.02	0.20	0.01
02.00	0.05	0.46	0.01
03.00	0.02	0.19	0.01
04.00	0.01	0.17	0.01
05.00	0.01	0.14	0.01
06.00	0.00	0.08	0.00
07.00	0.00	0.02	0.00
08.00	0.02	0.01	0.00
09.00	0.03	0.03	0.00
10.00	0.05	0.11	0.00
11.00	0.06	0.20	0.00
12.00	0.07	0.24	0.00
13.00	0.08	0.29	0.01
14.00	0.08	0.30	0.01

15.00	0.08	0.33	0.01
16.00	0.07	0.29	0.07
17.00	0.05	0.28	0.01
18.00	0.05	0.29	0.01
19.00	0.04	0.26	0.01
20.00	0.03	0.21	0.00
21.00	0.04	0.28	0.01
22.00	0.03	0.23	0.01
23.00	0.04	0.30	0.01
Media	**0.04**	**0.22**	**0.01**

In particolare, è possibile notare come la maggiore mitigazione media sia stata ottenuta a seguito dell'applicazione dello scenario RM2 che prevede l'installazione di facciate verdi e tetti verdi estensivi su tutti gli edifici nell'area urbana prescelta. Tale mitigazione media è dell'ordine di 0.22 °C. Tuttavia, in alcune ore della giornata, tale mitigazione raggiunge ~0.5 °C (i.e., ore 02.00) e ~0.3 °C dalle ore 13.00 alle ore 19.00.
Lo scenario RM3, invece, mostra la mitigazione media più bassa (i.e., 0.01 °C), con punte massime di 0.07 °C alle ore 16.00 e mitigazione pressoché nulla in tutte le altre ore della giornata.
Lo scenario RM1 mostra una mitigazione media dell'aria di 0.04 °C con punte massime di ~0.1 °C tra le 12.00 e le 16.00.
Di seguito sono stati investigati i comportamenti dei tre scenari di mitigazione dell'isola di calore urbana durante l'ora in cui maggiormente riducono la temperatura dell'aria a livello pedonale (i.e., ore 15.00) durante la giornata tipica estiva (i.e., 01/07/2015).
La Figura 90 mostra la mitigazione relativa all'applicazione dello scenario RM1 rispetto allo scenario di riferimento (i.e., *baseline*). È possibile osservare che l'installazione di tetti verdi estensivi riesce a ridurre la temperatura dell'aria in modo marginale nella maggior parte dell'area urbana. Una maggiore riduzione è osservata in corrispondenza di configurazioni urbane chiuse o a corte (i.e., a sud-ovest dell'area urbana), dove la mitigazione raggiunge ~0.2-0.25 °C.

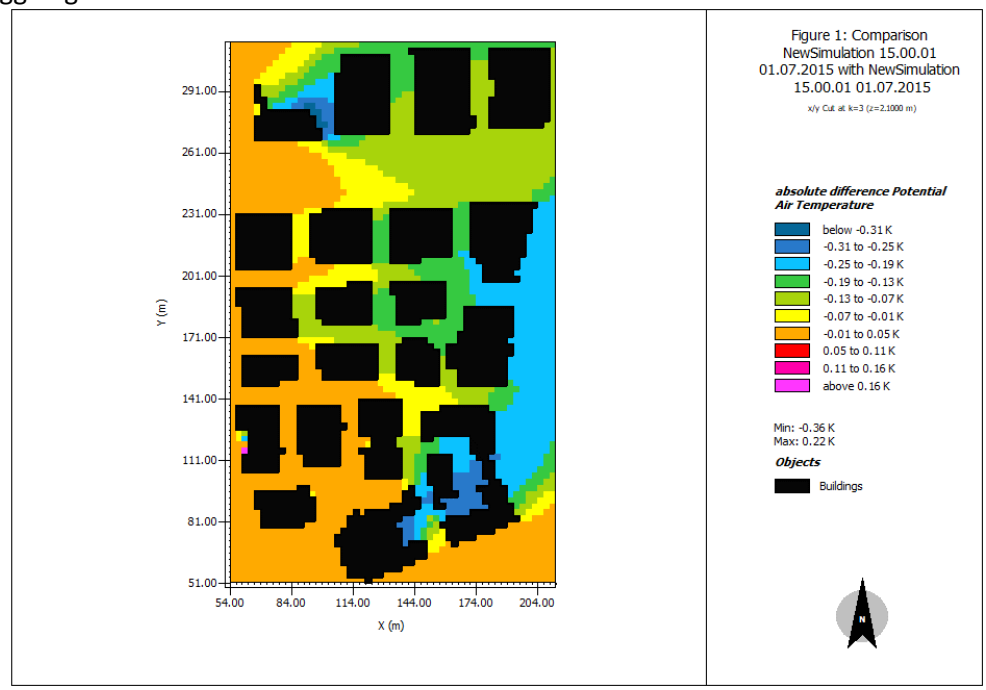


Figura 90. Confronto tra temperature dell'aria all'altezza del pedone (i.e., 2.1 m) tra scenario RM1 e scenario *baseline* ore 15.00 del 01/07/2015

La Figura 91 mostra l'effetto dell'applicazione dello scenario RM2. Si può notare come per la maggior parte dell'area urbana si ottenga una riduzione della temperatura dell'aria all'altezza dei pedoni di ~0.5-0.8 °C e che in alcune aree, come per esempio le corti che si formano tra gli edifici (i.e., a sud-ovest dell'area urbana), tale mitigazione raggiunge 1 °C risultando parzialmente efficace nel mitigare l'isola di calore urbana.

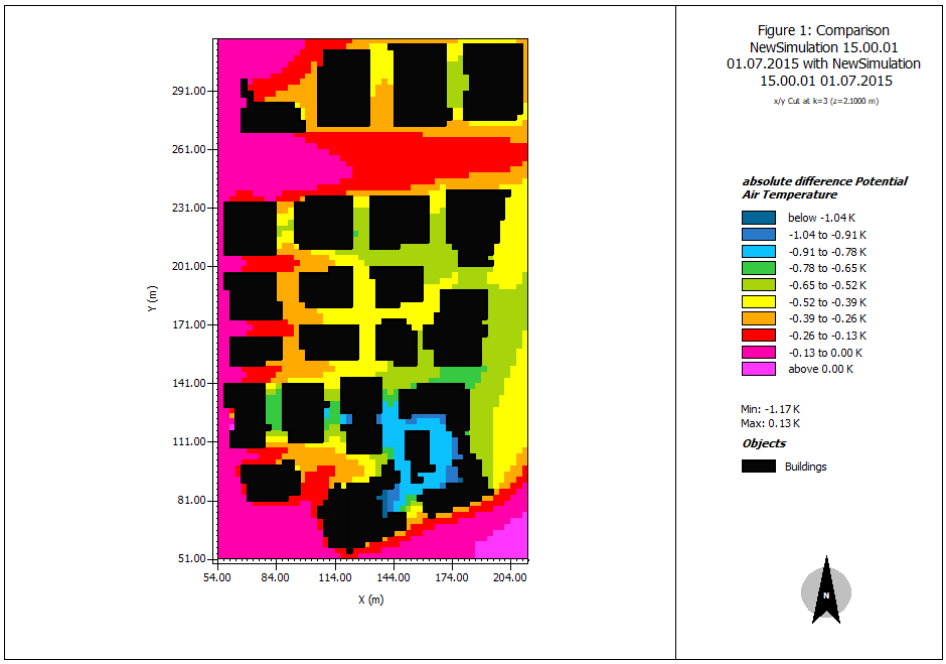


Figura 91. Confronto tra temperature dell'aria all'altezza del pedone (i.e., 2.1 m) tra scenario RM2 e scenario *baseline* ore 15.00 del 01/07/2015

La Figura 92 mostra l'effetto dell'applicazione dello scenario RM3. In particolare, si può notare che l'applicazione delle facciate verdi su di un singolo edificio riesca a mitigare la temperatura dell'aria all'altezza dei pedoni di soli 0.04 °C. Tale riduzione resta circoscritta ad un'area limitrofa alla parete stessa senza apportare alcun beneficio al resto dell'area urbana.

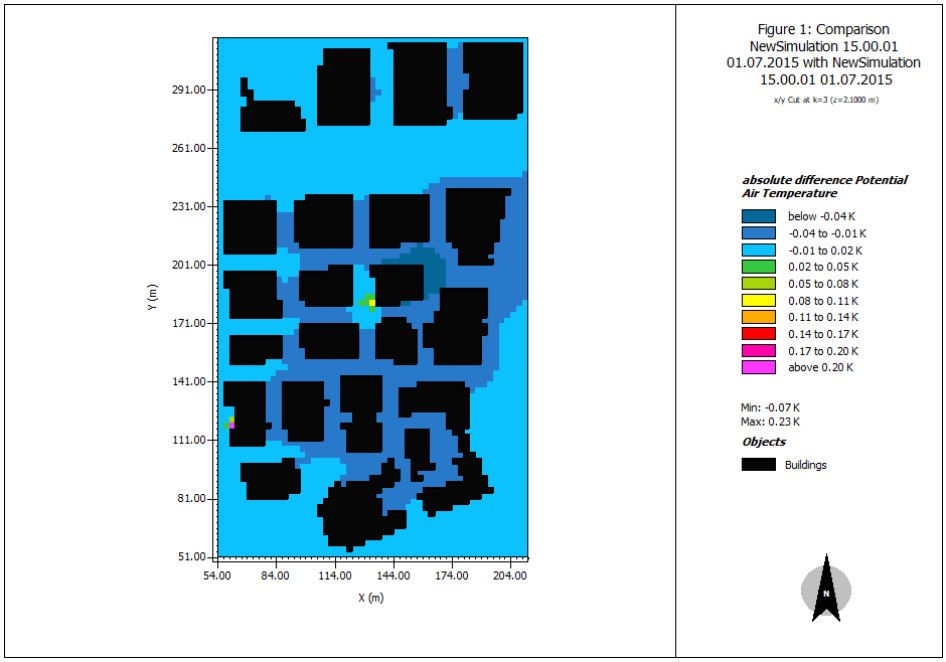


Figura 92. Confronto tra temperature dell'aria all'altezza del pedone (i.e., 2.1 m) tra scenario RM3 e scenario *baseline* ore 15.00 del 01/07/2015

In sintesi, l'applicazione dei tre scenari di mitigazione ha mostrato che:
- l'applicazione isolata di pareti verdi su un edificio (i.e., scenario RM3) non ha effetti misurabili sulla mitigazione dell'isola di calore urbana;
- l'effetto dell'installazione dei tetti verdi estensivi (i.e., scenario RM1) raggiunge 0.08 °C ma non è risolutivo dell'isola di calore urbana. Il valore ridotto dell'effetto dell'installazione dei tetti verdi estensivi è dovuto all'altezza su cui sono installati i tetti verdi (i.e., 20 m);
- la maggiore mitigazione è raggiunta quando vengono installati in modo combinato tetti verdi e facciate verdi (i.e., scenario RM2). In particolare, si è osservato che la massima mitigazione raggiunge ~0.5 °C e che in media l'isola di calore è mitigata di 0.22 °C. Inoltre, in alcuni punti la mitigazione raggiunge anche 1 °C. Tali risultati vanno però maggiormente riferiti all'applicazione di facciate verdi. Infatti, nonostante non si possa affermare che l'applicazione di facciate verdi e tetti verdi estensivi abbia un effetto additivo, è possibile invece notare come sia esiguo il contributo della sola installazione di tetti verdi estensivi (i.e., scenario RM1). Pertanto, si può dedurre che l'applicazione di facciate verdi, in questa particolare configurazione urbana, possa contribuire maggiormente alla mitigazione dell'isola di calore urbana.

Come per la giornata tipica invernale, la variazione di concentrazione di biossido di carbonio è stata considerata nell'ora più calda di tutta la giornata, ovvero alle ore 11.00. La Figura 93 mostra che durante la giornata tipica estiva la concentrazione massima di CO_2 è pari a circa 720 mg/m^3 ed è pressocché uniforme nella maggior parte dell'area urbana considerata. Valori inferiori di CO_2 sono presenti nella parte Nord dell'area, ovvero la zona in cui vi sono alberature stradali disposte regolarmente. Al contrario, le aree caratterizzate dalla presenza di *canyon* urbani sono quelle in cui le concentrazioni di CO_2 sono più elevate.

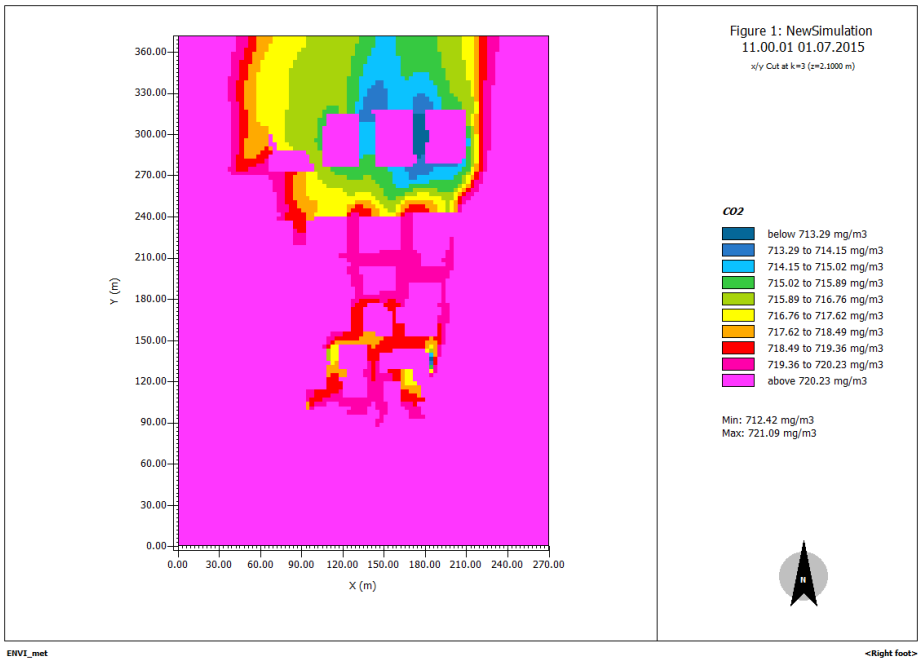


Figura 93. Concentrazione di CO_2 (mg/m^3) dell'aria all'altezza del pedone (i.e., 2.1 m) scenario *baseline* ore 11.00 del 01/07/2015

La Figura 94 mostra come, anche in questo caso, come nel caso del giorno tipico invernale, la variazione di biossido di carbonio sia esigua. In particolare, la mitigazione delle CO_2 raggiunge massimo 0.15 mg/m^3. Tale mitigazione viene registrata nella zona più aperta e, pertanto, più ventilata dell'intera area urbana, ovvero nella parte Nord-Est.

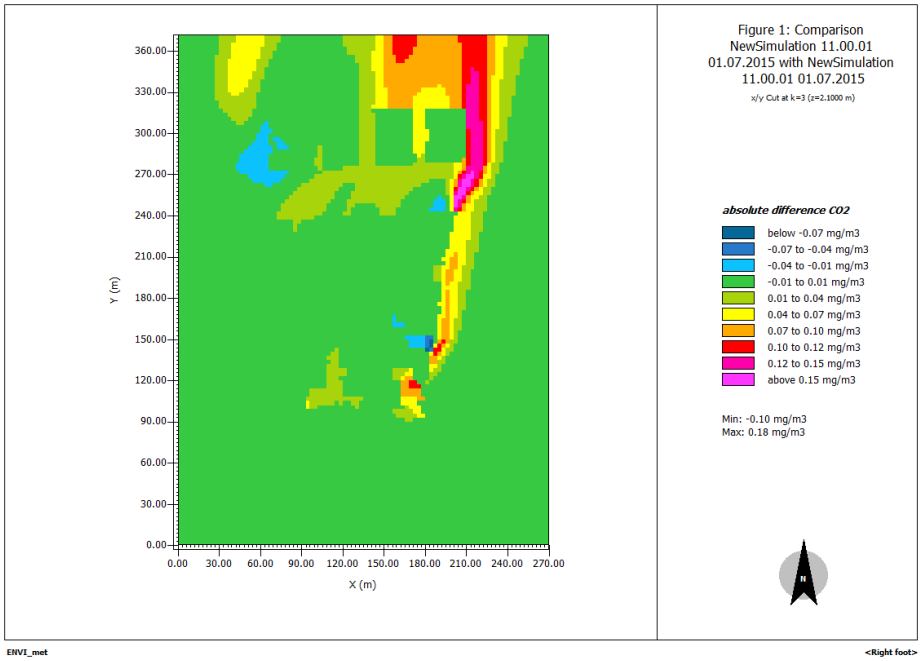


Figura 94. Confronto tra concentrazione di CO_2 (mg/m^3) dell'aria all'altezza del pedone (i.e., 2.1 m) tra scenario *baseline* e scenario RM1 ore 11.00 del 01/07/2015

Similmente, anche la Figura 95 e la Figura 96 mostrano esigue variazioni di CO_2 a seguito dell'applicazione degli scenari di mitigazione RM2 e RM3.

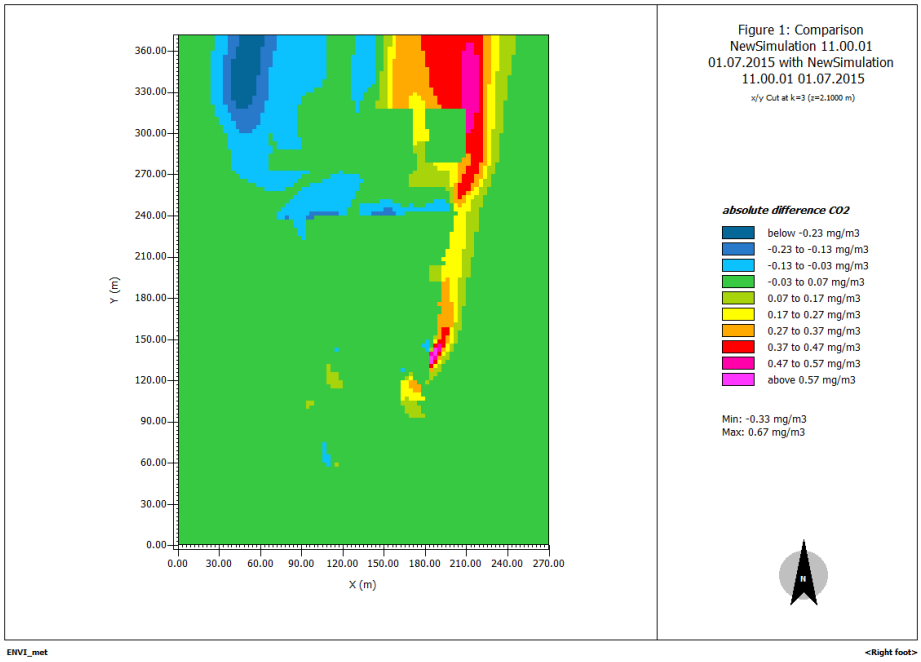


Figura 95. Confronto tra concentrazione di CO_2 (mg/m^3) dell'aria all'altezza del pedone (i.e., 2.1 m) tra scenario *baseline* e scenario RM2 ore 11.00 del 01/07/2015

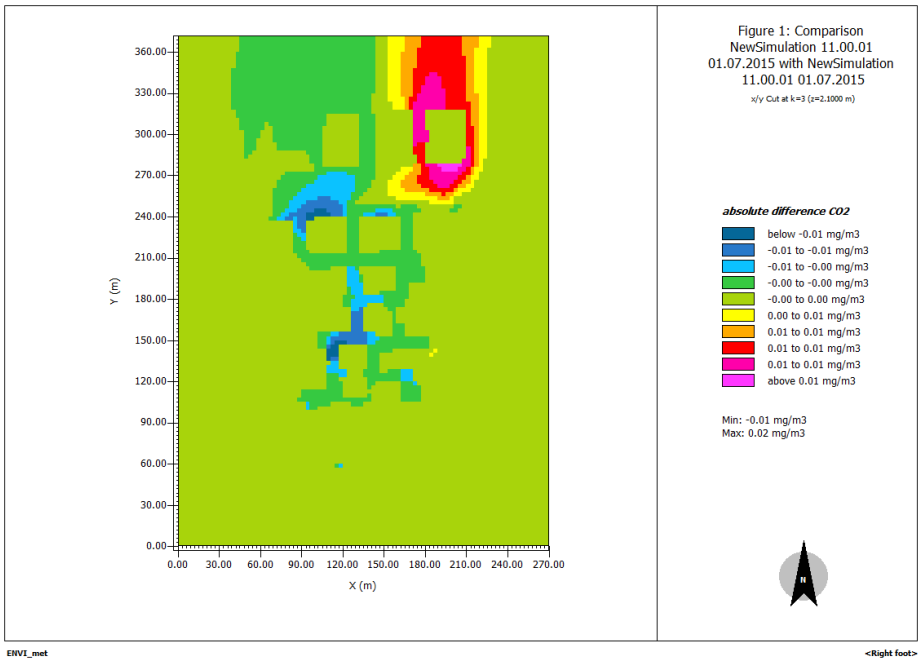


Figura 96. Confronto tra concentrazione di CO_2 (mg/m^3) dell'aria all'altezza del pedone (i.e., 2.1 m) tra scenario *baseline* e scenario RM3 ore 11.00 del 01/07/2015

In particolare, la Figura 95 mostra una diffusa variazione della concentrazione della CO_2 che va da -0.03 a 0.07 mg/m^3 e che rispetto ai valori di riferimento può essere considerata del tutto insignificante. Nella parte Nord dell'area urbana selezionata, si può, tuttavia, individuare una zona interessata da una maggiore mitigazione della

concentrazione di CO_2, nell'ordine di 0.37-0.47 mg/m^3. Tale mitigazione sembra essere attribuibile alla maggiore ventosità della zona che è, in quei punti, più aperta rispetto al resto dell'area urbana selezionata.
La Figura 96 mostra che la sola installazione di pareti verdi su di un singolo edificio non provoca effetti, in termini di mitigazione della concentrazione di CO_2, nell'area urbana selezionata. Al contrario, lungo i *canyon* urbani si possono notare aree che presentano ristagni, seppure minimi, di CO_2 nello scenario RM3 rispetto allo scenario base.

7.1.4 Confronto tra le temperature dell'aria e CO_2 all'altezza dei pedoni relativi a scenari riferiti alla giornata tipica con ondata di calore (22/07/2015)

È stato anche indagato l'effetto dell'applicazione degli scenari di mitigazione sulle temperature giornaliere di una giornata tipica di un'ondata di calore (i.e., 22/07/2015) (Figura 97).

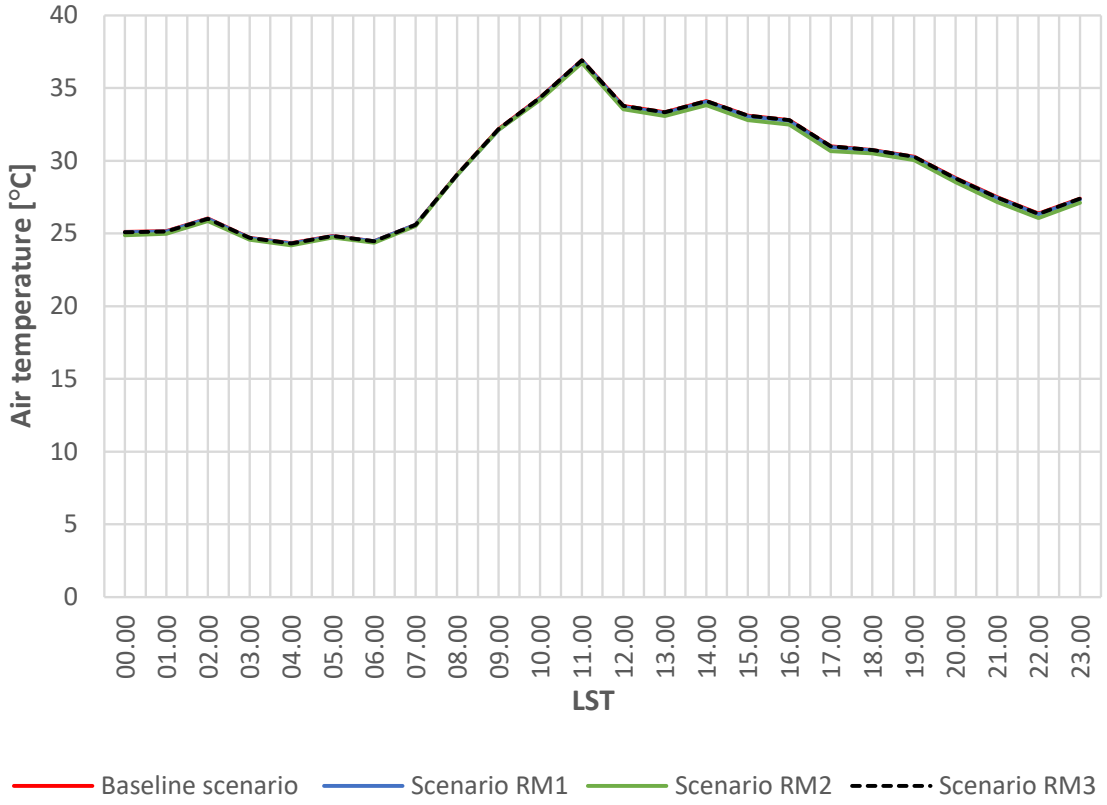


Figura 97. Temperature medie relative ad un'ondata di calore (i.e., a 2.1 m dal suolo) calcolate per l'intera area urbana selezionata per il giorno tipico con ondata di calore (i.e., 22/07/2015)

È possibile notare che, anche in questo caso, le temperature degli scenari di mitigazione ricalcano bene l'andamento delle temperature dello scenario *baseline*. Infatti, la Tabella 29 mostra che la mitigazione media relativa allo scenario RM1 è pari a 0.04 °C, quella relativa allo scenario RM2 è pari a 0.22 °C e quella relativa allo scenario RM3 è pari a 0.01.

Tabella 29. Confronto tra le temperature dello scenario di controllo e gli scenari di mitigazione per il giorno tipico con ondata di calore (i.e., 22/07/2015)

Ora	$\Delta T_{Baseline-RM1}$	$\Delta T_{Baseline-RM2}$	$\Delta T_{Baseline-RM3}$
00.00	0.02	0.23	0.01
01.00	0.02	0.18	0.01
02.00	0.02	0.16	0.01

03.00	0.02	0.14	0.01
04.00	0.02	0.14	0.01
05.00	0.01	0.10	0.00
06.00	0.01	0.09	0.00
07.00	0.01	0.08	0.00
08.00	0.02	0.03	0.00
09.00	0.04	0.05	0.00
10.00	0.06	0.16	0.00
11.00	0.03	0.18	0.00
12.00	0.07	0.24	0.00
13.00	0.06	0.26	0.01
14.00	0.06	0.30	0.01
15.00	0.06	0.31	0.01
16.00	0.06	0.31	0.01
17.00	0.06	0.35	0.01
18.00	0.04	0.26	0.01
19.00	0.04	0.23	0.01
20.00	0.04	0.29	0.01
21.00	0.04	0.33	0.01
22.00	0.04	0.31	0.01
23.00	0.05	0.29	0.01
Media	**0.04**	**0.21**	**0.01**

Nel dettaglio, lo scenario di mitigazione RM1 mostra il valore massimo di mitigazione dalle ore 12.00 fino alle ore 17.00, quando la temperatura diminuisce di 0.07-0.06 °C; similmente lo scenario RM2 mostra la massima mitigazione in corrispondenza delle ore 12.00-17.00 quando la temperatura diminuisce di 0.2-0.4 °C. Infine, l'applicazione dello scenario RM3 mostra una mitigazione irrilevante dell'isola di calore urbana che raggiunge il suo massimo di 0.01 °C nelle ore 00.00-04.00 e 13.00-23.00.

Per quel che riguarda la giornata tipica con ondata di calore, di seguito, si è scelto di analizzare più nel dettaglio l'ora in cui gli scenari esercitano il maggiore effetto, ovvero le ore 17.00.

La Figura 98 mostra che l'effetto dovuto all'applicazione dello scenario RM1 dipende fortemente dal vento. In particolare, il vento da nord-est convoglia l'aria che si raffredda all'altezza dei tetti per la presenza della vegetazione, verso sud-ovest, determinando una riduzione della temperatura ad altezza pedonale. Tuttavia, la magnitudo di tale mitigazione resta esigua, ovvero dell'ordine di 0.10 °C nella maggior parte dell'area e comunque al disotto dei 0.22 °C.

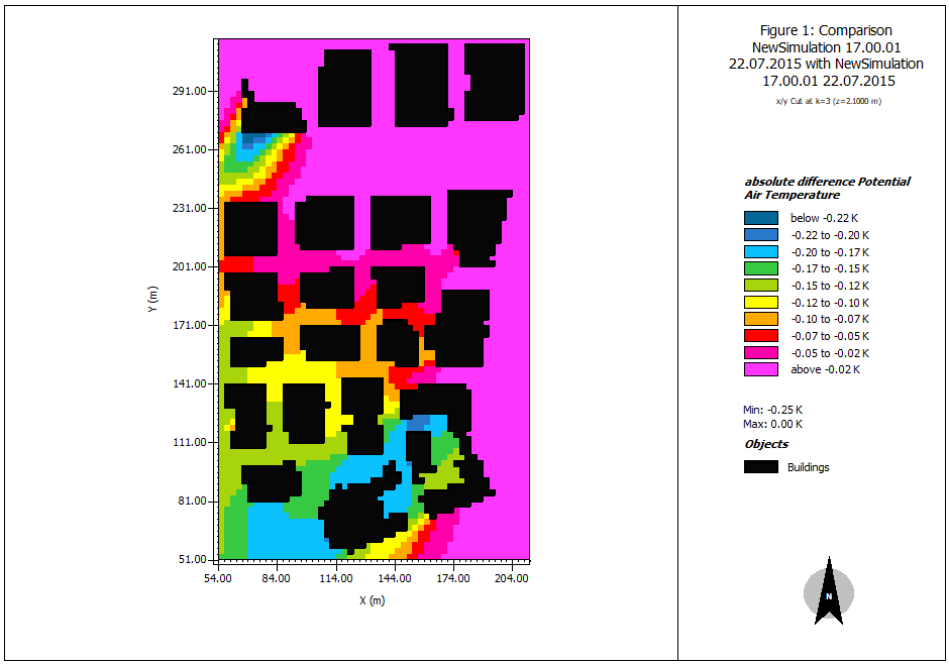


Figura 98. Confronto tra temperature dell'aria all'altezza del pedone (i.e., 2.1 m) tra scenario RM1 e scenario *baseline* ore 17.00 del 22/07/2015

L'applicazione dello scenario RM2 mostra, in Figura 99, una riduzione di ~0.6 °C nella maggior parte dell'area con punte di mitigazione di ~0.8 °C. In particolare, si creano delle sacche di aria più fredda intrappolata da edifici disposti a corte che, grazie alla loro conformazione, trattengono l'aria più fresca che, quindi, non viene dispersa dal vento.

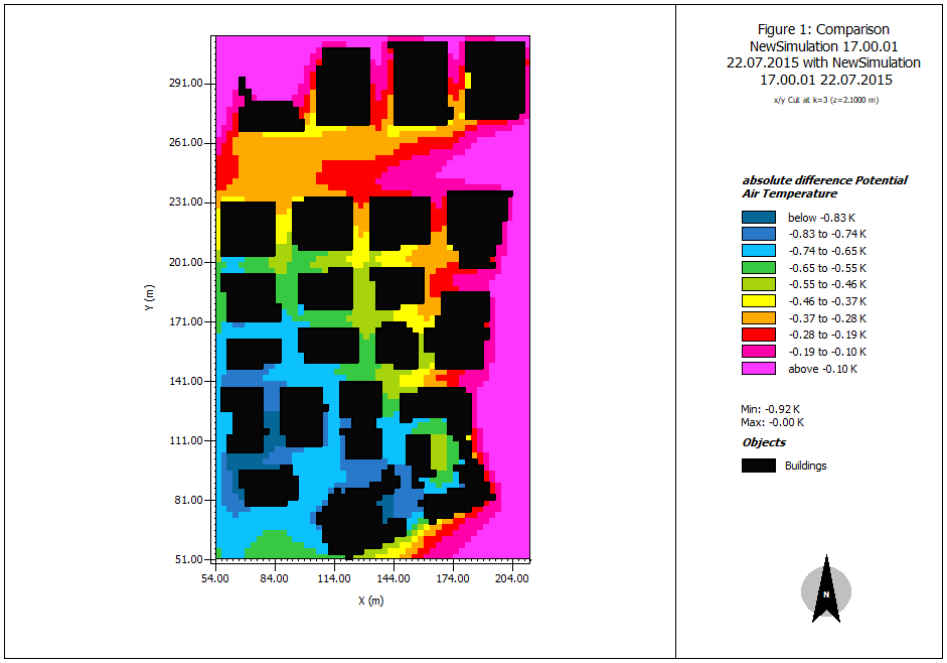


Figura 99. Confronto tra temperature dell'aria all'altezza del pedone (i.e., 2.1 m) tra scenario RM2 e scenario *baseline* ore 17.00 del 22/07/2015

Infine, la Figura 100 mostra l'effetto dell'applicazione dello scenario RM3. Come nei casi precedenti, si può notare che l'applicazione di facciate verdi su di un singolo edificio produce una mitigazione circoscritta e di entità

contenuta. Nello specifico, l'installazione di pareti verdi produce una diminuzione massima della temperatura pari a 0.12 °C.

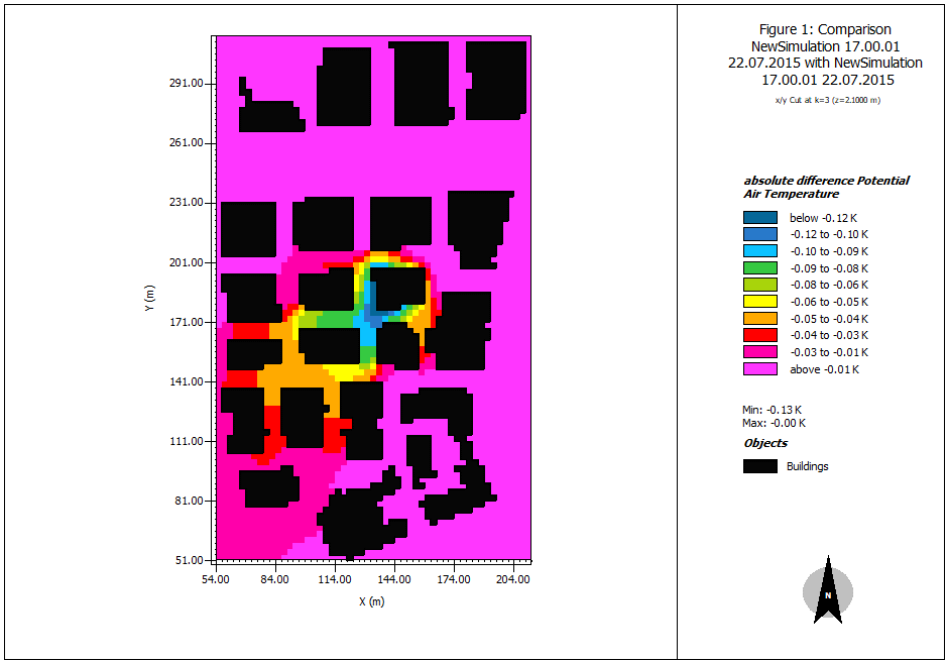


Figura 100. Confronto tra temperature dell'aria all'altezza del pedone (i.e., 2.1 m) tra scenario RM3 e scenario *baseline* ore 17.00 del 22/07/2015

In sintesi, l'applicazione dei tre scenari di mitigazione ha mostrato che:
- l'applicazione isolata di pareti verdi su un edificio (i.e., scenario RM3) non ha effetti misurabili sulla mitigazione dell'isola di calore urbana;
- l'effetto dell'installazione dei tetti verdi estensivi (i.e., scenario RM1) raggiunge 0.07 °C ma non è risolutivo dell'isola di calore urbana. Il valore ridotto dell'effetto dell'installazione dei tetti verdi estensivi è dovuto all'altezza su cui sono installati i tetti verdi (i.e., 20 m);
- la maggiore mitigazione è raggiunta quando vengono installati in modo combinato tetti verdi e facciate verdi (i.e., scenario RM2). In particolare, si è osservato che la massima mitigazione raggiunge 0.3 °C e che in media l'isola di calore è mitigata di 0.21 °C. Tali risultati vanno però maggiormente riferiti all'applicazione di facciate verdi. Infatti, nonostante non si possa affermare che l'applicazione di facciate verdi e tetti verdi estensivi abbia un effetto additivo, è possibile invece notare come sia esiguo il contributo della sola installazione di tetti verdi estensivi (i.e., scenario RM1). Pertanto, si può dedurre che l'applicazione di facciate verdi, in questa particolare configurazione urbana, possa contribuire maggiormente alla mitigazione dell'isola di calore urbana.

Anche per la giornata tipica con ondata di calore è stata valutata la concentrazione di biossido di carbonio nello scenario base (Figura 101) e poi questa è stata confrontata con le concentrazioni di CO_2 nei tre scenari di mitigazione: RM1, RM2 e RM3.

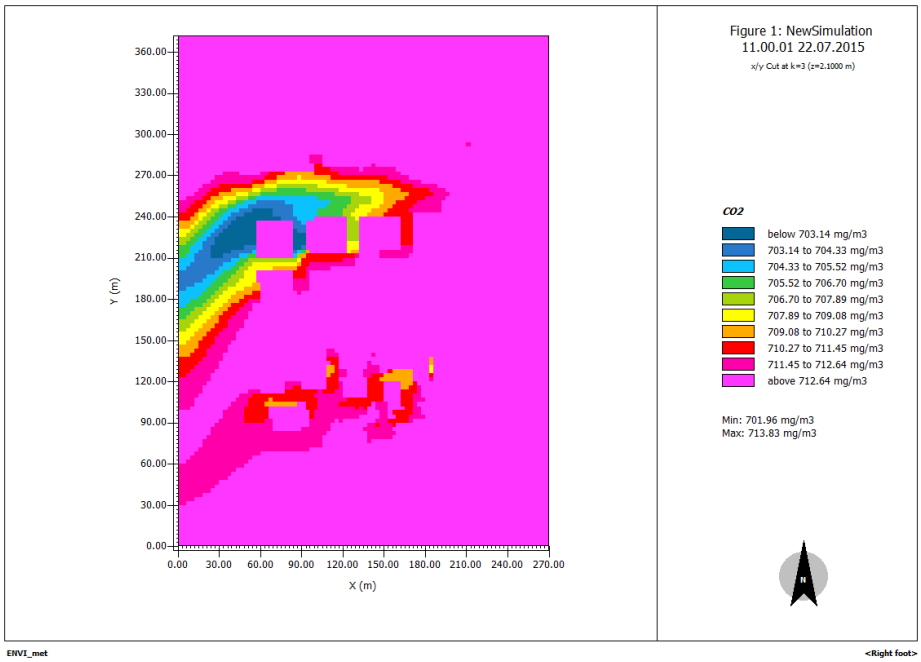


Figura 101. Concentrazione di CO_2 (mg/m^3) dell'aria all'altezza del pedone (i.e., 2.1 m) scenario *baseline* ore 11.00 del 22/07/2015

La Figura 101 mostra che l'area urbana selezionata è interessata da concentrazioni di biossido di carbonio pressocché costanti e dell'ordine di 713 mg/m^3 e che in alcune zone tale concentrazione si attesti su circa 703 mg/m^3. Tali valori sono probabilmente influenzati dalla direzione del vento e dalla presenza delle alberature stradali. Lo scenario base è stato confrontato con lo scenario RM1 (Figura 102).

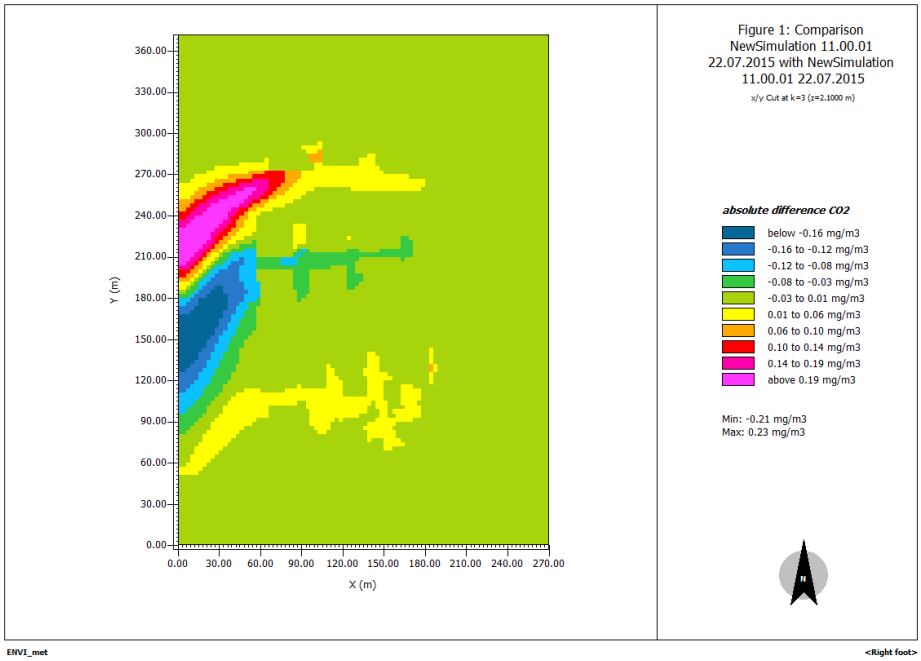


Figura 102. Confronto tra concentrazione di CO_2 (mg/m^3) dell'aria all'altezza del pedone (i.e., 2.1 m) tra scenario *baseline* e scenario RM1 ore 11.00 del 22/07/2015

La Figura 102 mostra che l'applicazione dello scenario RM1 non determina variazioni della concentrazione della CO_2 nell'aria nelle zone interessate dalla presenza di *canyon* urbani. Invece, ci sono diminuzione della stessa concentrazione in zone più periferiche dell'area stessa (e.g., nella zona ad Est). Queste diminuzioni sono probabilmente dovute alla direzione del vento.
L'applicazione dello scenario RM2, che prevede sia l'installazione di tetti verdi sia l'installazione di pareti verdi su tutti gli edifici dell'area urbana selezionata, determina una variazione molto limitata (i.e., -0.03-0.06 mg/m^3 di CO_2) (Figura 103). Tale variazione è compresa sostanzialmente indica una inefficacia dello scenario RM2 nel mitigare la concentrazione di CO_2 nell'aria.

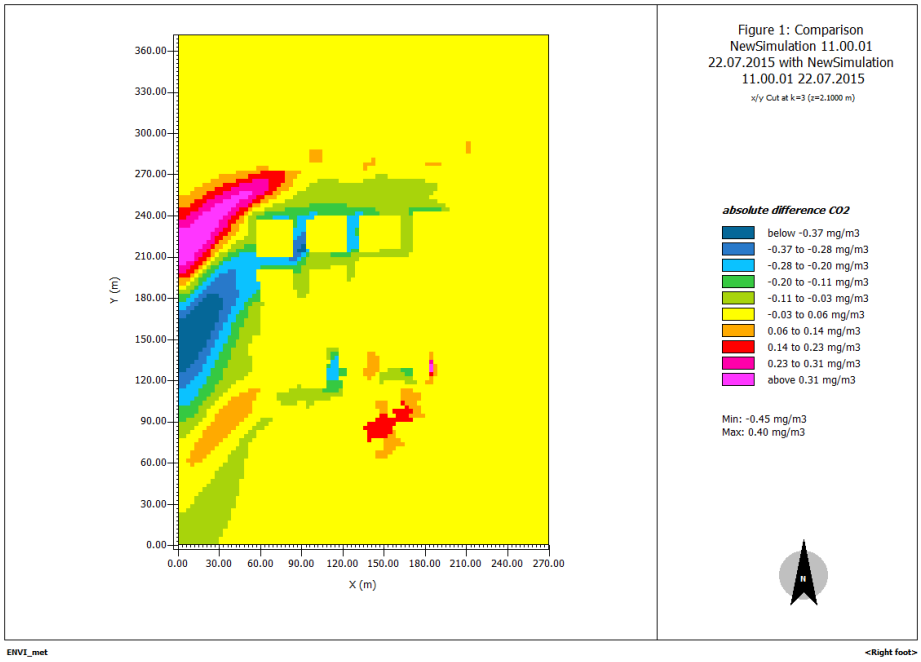


Figura 103. Confronto tra concentrazione di CO_2 (mg/m^3) dell'aria all'altezza del pedone (i.e., 2.1 m) tra scenario *baseline* e scenario RM2 ore 11.00 del 22/07/2015

In Figura 104 è riportato l'effetto dell'applicazione dello scenario RM3 sulla concentrazione di biossido di carbonio. In particolare, è possibile notare che nella quasi totalità dell'area urbana la variazione di CO_2 sia nulla e che lì dove è possibile trovare una diminuzione della stessa, i valori di riduzione sono così limitati (i.e., 0.01 mg/m^3) da poter essere considerati nulli.

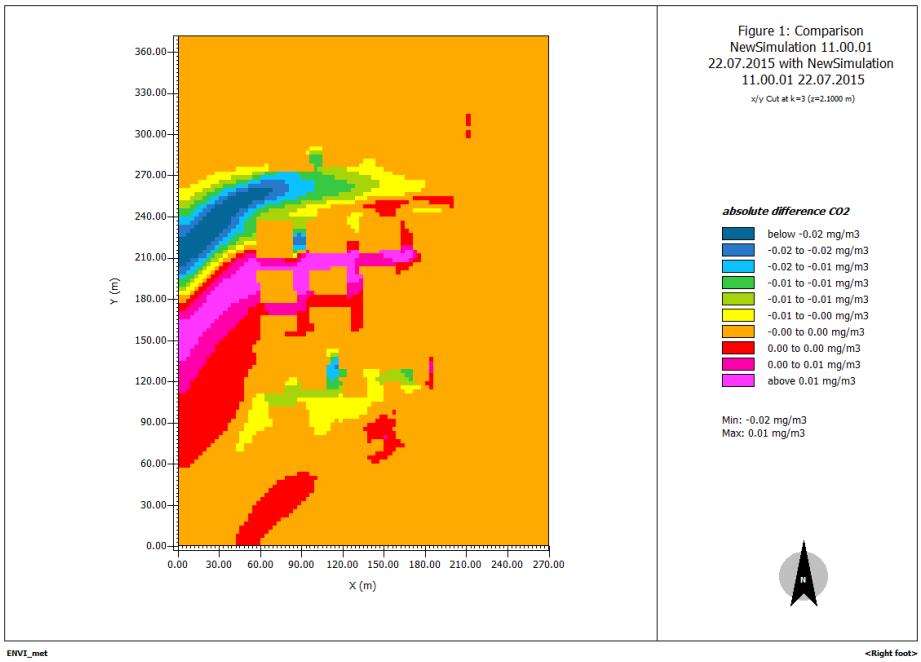


Figura 104. Confronto tra concentrazione di CO_2 (mg/m^3) dell'aria all'altezza del pedone (i.e., 2.1 m) tra scenario *baseline* e scenario RM3 ore 11.00 del 22/07/2015

7.2 Torino

7.2.1 Scenari *baseline*

Gli *output* delle simulazioni ENVI-met sono stati analizzati rispetto sia alle temperature registrate in ambiente urbano sia rispetto a quelle registrate in ambito rurale. Le temperature simulate sono state considerate ad un'altezza di 22.5 m sul livello del terreno, ovvero ad un'altezza molto simile rispetto a quella reale alla quale si trova la centralina da cui sono stati registrati i dati meteorologici utilizzati per il confronto delle temperature dell'aria. Di seguito sono riportate le temperature relative alle tre giornate significative (Figura 105-Figura 107).

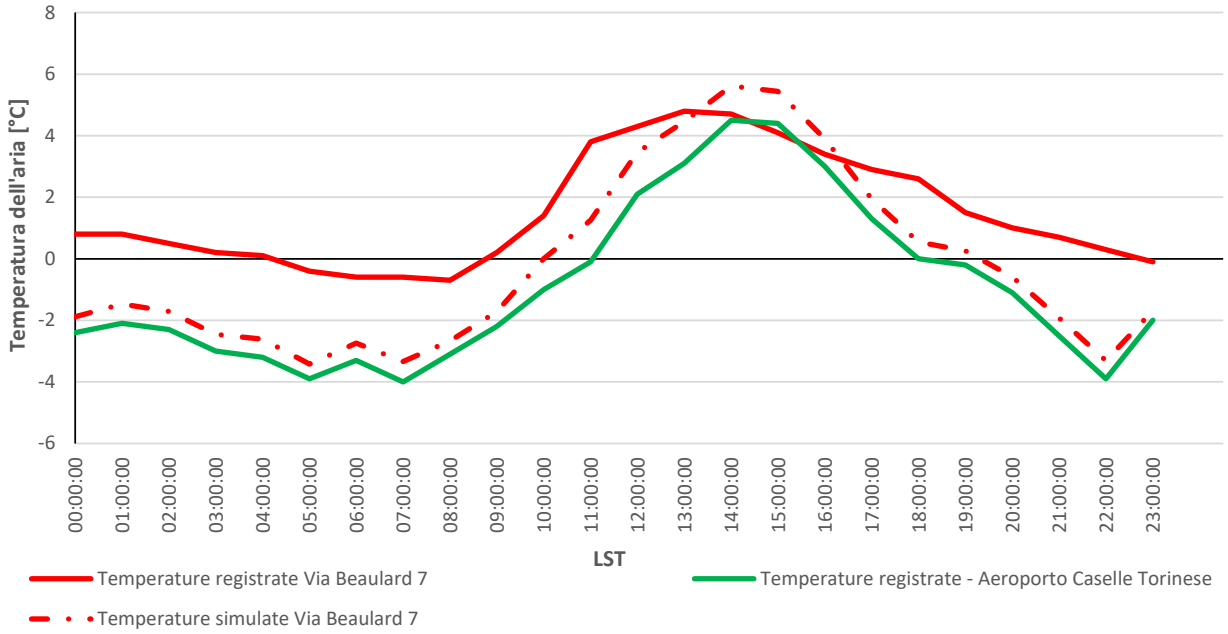


Figura 105. Temperature dell'aria registrate e simulate in Via Beaulard 7 relative al giorno tipico invernale (i.e., 19/01/2016)

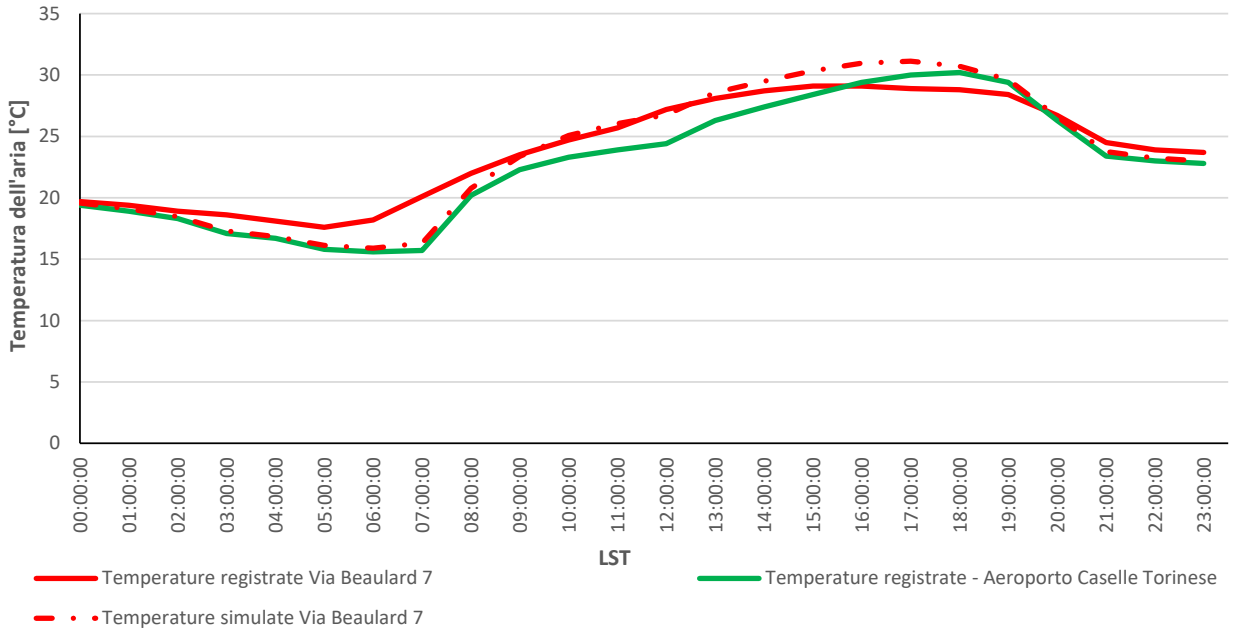


Figura 106. Temperature dell'aria registrate e simulate in Via Beaulard 7 relative al giorno tipico estivo (i.e., 27/07/2014)

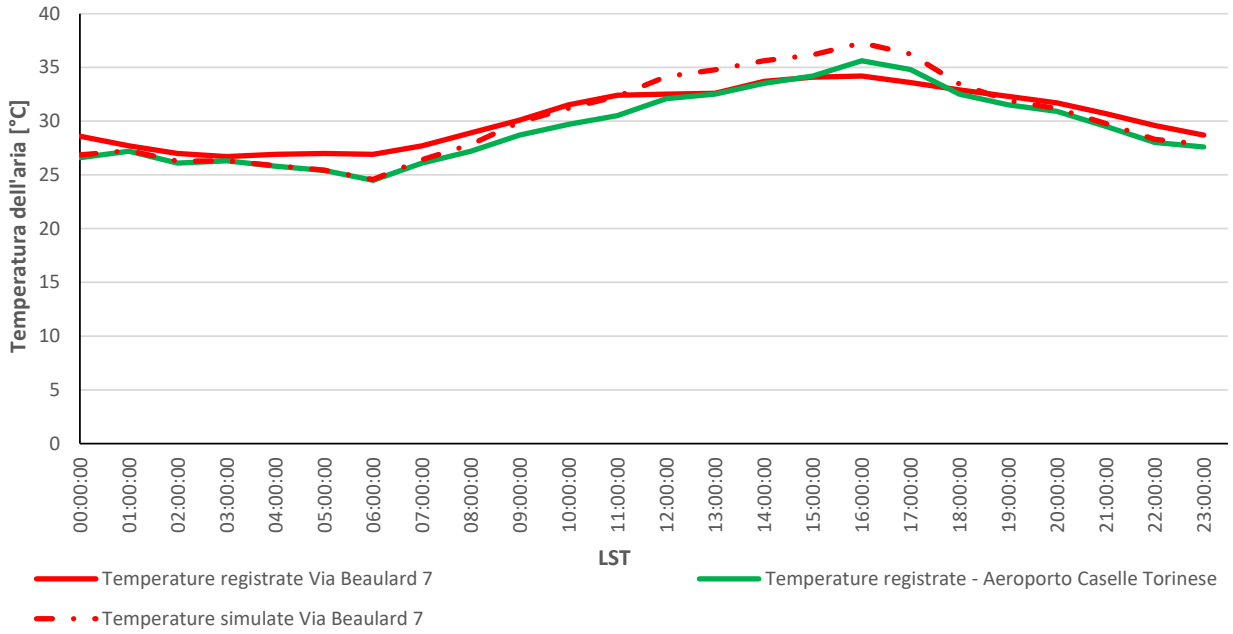


Figura 107. Temperature dell'aria registrate e simulate in Via Beaulard 7 relative al giorno tipico con ondata di calore (i.e., 07/07/2015)

È possibile notare come le temperature simulate dell'aria ricalchino l'andamento delle temperature rurali, usate per forzare il modello ENVI-met, nelle tre giornate tipiche. Inoltre, le figure da Figura 105 a Figura 107 mostrano che le temperature simulate tendono a sovrastimare le temperature massime registrate in via Beaulard 7. La Tabella 30 mostra per ciascuna delle tre giornate tipo gli errori calcolati tra le temperature registrate e le temperature simulate così come anche la variazione tra temperature massime registrate e simulate.

Tabella 30. Errori tra temperature registrate e temperature simulate relative a via Beaulard 7

	Mean Absolute Error (MAE)	Root Mean Square Error (RMSE)	ΔT temperature massime
Giornata tipica invernale	1.91 °C	2.08 °C	0.81 °C [1]
Giornata tipica estiva	1.06 °C	1.37 °C	2.02 °C [2]
Giornata tipica con ondata di calore	1.220 °C	1.47 °C	3.08 °C [3]

[1] La temperatura massima registrata corrisponde alle ore 13.00 del 19/01/2016, mentre la temperatura massima simulata corrisponde alle ore 14.00. La differenza tra le temperature massime è pari a 0.81 °C, mentre alle ore 13.00 e alle ore 14.00 le differenze tra temperature registrate e simulate sono pari a 0.34 °C e 0.91 °C

[2] La temperatura massima registrata corrisponde alle ore 16.00 del 27/07/2014, mentre la temperatura massima simulata corrisponde alle ore 17.00. La differenza tra le temperature massime è pari a 2.02 °C, mentre alle ore 16.00 e alle ore 17.00 le differenze tra temperature registrate e simulate sono pari a 1.9 °C e 2.2 °C

[3] La temperatura massima registrata corrisponde alle ore 16.00 del 07/07/2015, mentre la temperatura massima simulata corrisponde alle ore 16.00. La differenza tra le temperature massime è pari a 3.08 °C

I dati presenti in Tabella 30 sono stati confrontati con quelli riportati in Figura 74, ovvero quelli relativi ai valori RMSE e MAE calcolati da studi presenti in letteratura. Dal confronto risulta che per la giornata tipica invernale, i valori di RMSE e MAE del caso di studio di Torino sono paragonabili ai valori medi trovati e rappresentati in Figura 74. Invece, per quel che riguarda i valori relativi alla giornata tipica estiva e tipica con ondata di calore, i valori trovati e riportati in Tabella 30 sono inferiori sia ai valori medi sia ai valori mediani riportati in Figura 74. Pertanto, i dati simulati nel presente studio possono essere considerati attendibili almeno quanto quelli utilizzati in altri studi pubblicati che hanno utilizzato il *software* ENVI-met. Nel seguito, verranno investigati i dati di temperatura dell'aria all'altezza dei pedoni, ovvero a circa 2 m dal suolo. In particolare, verrà considerata la temperatura media a circa 2 m dal suolo per l'intero dominio investigato e verranno investigati alcuni punti particolari del dominio stesso.

Similmente sono stati confrontati i valori delle velocità del vento registrate sia in ambito urbano, sia in ambito rurale con quelle simulate da ENVI-met (Figura 108-Figura 110) e sono stati calcolati i valori di MAE e RMSE (Tabella 31).

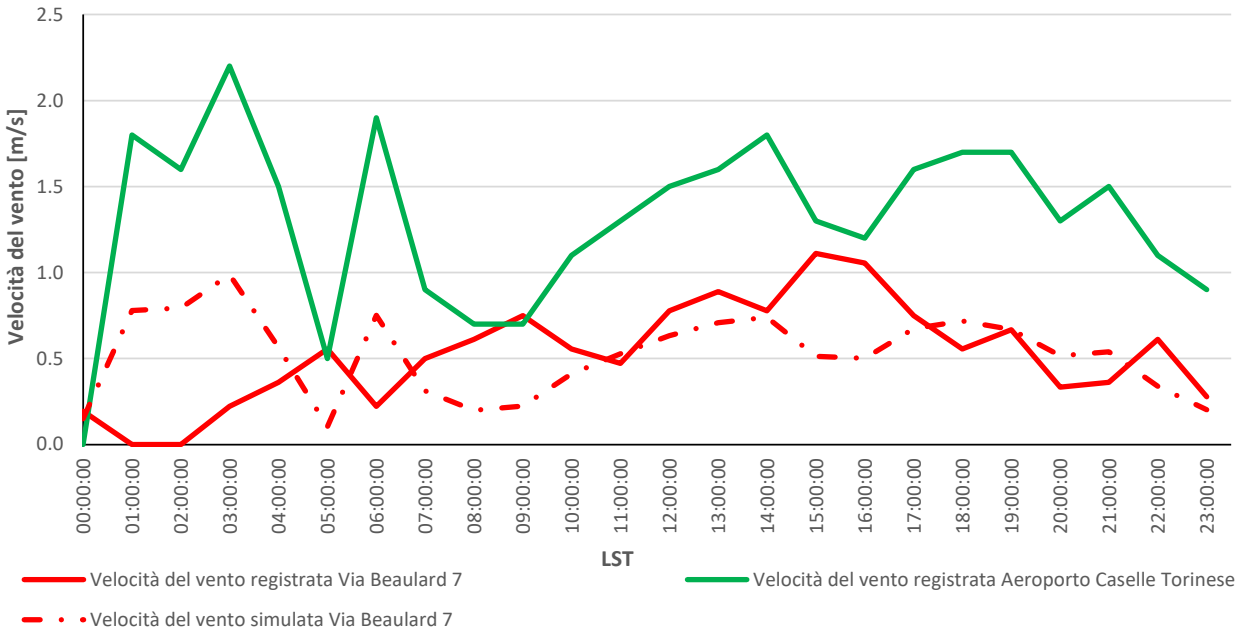


Figura 108. Velocità del vento registrate e simulate in Via Beaulard 7 relative al giorno tipico invernale (i.e., 19/01/2016)

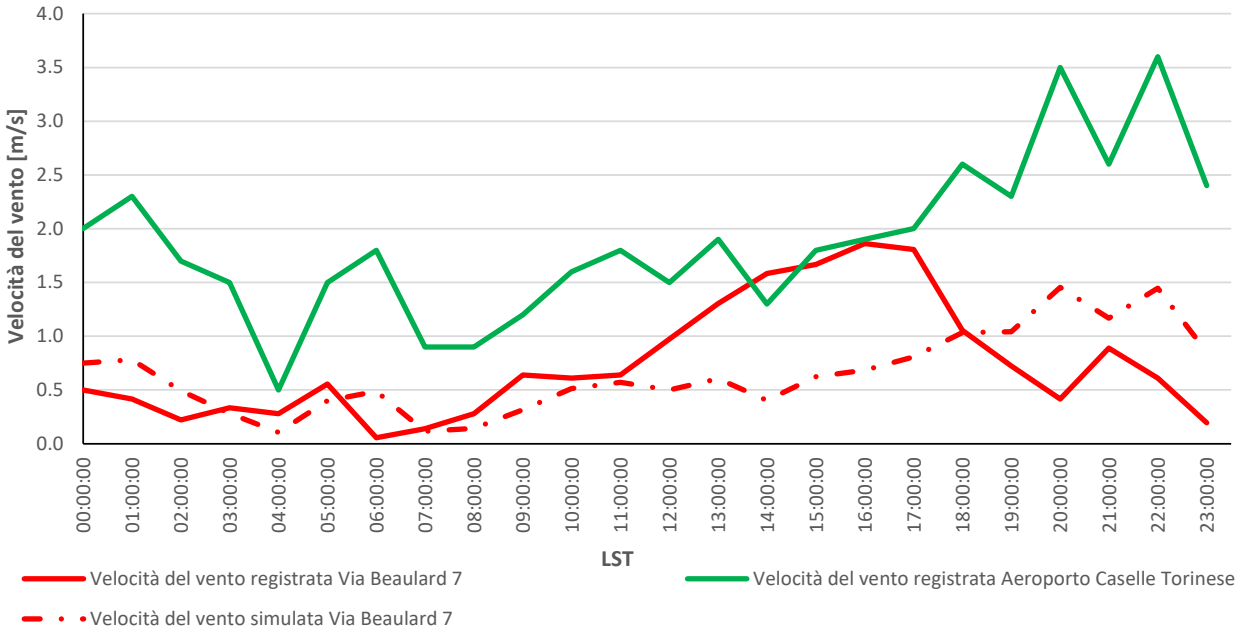


Figura 109. Velocità del vento registrate e simulate in Via Beaulard 7 relative al giorno tipico estivo (i.e., 27/07/2014)

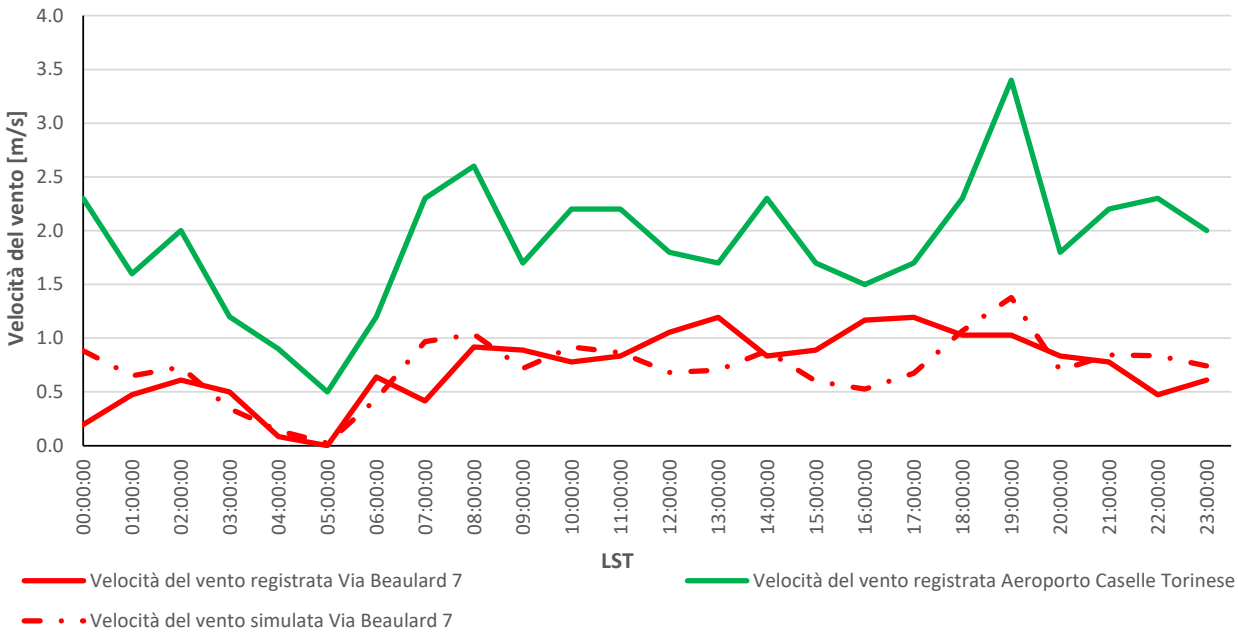


Figura 110. Velocità del vento registrate e simulate in Via Beaulard 7 relative al giorno tipico con conondata di calore (i.e., 07/07/2015)

Tabella 31. Errori tra velocità del vento registrate e simulate relative a via Beaulard 7

	Mean Absolute Error (MAE)	Root Mean Square Error (RMSE)
Giornata tipica invernale	0.31 m/s	0.40 m/s
Giornata tipica estiva	0.46 m/s	0.60 m/s
Giornata tipica con ondata di calore	0.25 m/s	0.32 m/s

La Figura 108 mostra come il modello, nella giornata invernale, sovrastimi la velocità del vento, rispetto a quelle misurate in via Beaulard, nelle prime ore della notte e la sottostimi in mattinata e nel primo pomeriggio. L'errore quadratico medio e l'errore medio assoluto sono, rispettivamente, 0.40 m/s e 0.31 m/s. Da Figura 109 si nota che nel giorno tipico estivo, il modello simula con una buona precisione la velocità del vento in via Beaulard sino a circa le ore 11:00, per poi sottostimare i valori reali sino alle 18:00 e sovrastimarli nel corso della sera. L'errore quadratico medio e l'errore medio assoluto sono, rispettivamente, 0.60 m/s e 0.46 m/s. Per la giornata caratterizzata da ondata di calore, la Figura 110 mostra che i valori simulati ricalcano bene l'andamento delle velocità del vento relative alle ore notturne e mattutine di via Beaulard, mentre durante il pomeriggio il modello tende a fare una sottostima. L'errore quadratico medio e l'errore medio assoluto sono, rispettivamente, 0.32 m/s e 0.25 m/s (Tabella 31).

7.2.2 Confronto tra temperature dell'aria all'altezza dei pedoni relative a scenari riferiti alla giornata tipica invernale (19/01/2016)

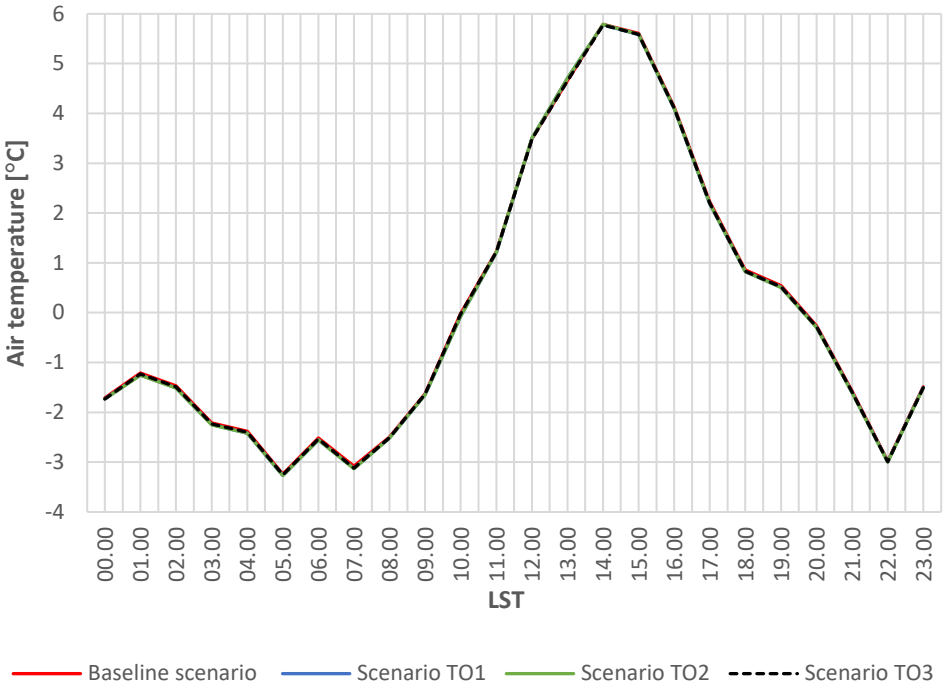


Figura 111. Temperature medie invernali dell'aria (i.e., a 2.1 m dal suolo) calcolate per l'intera area urbana selezionata (i.e., 19/01/2016)

La Tabella 32 mostra l'effetto dell'applicazione degli scenari di mitigazione rispetto allo scenario di controllo per tutte le ore del giorno tipico invernale (i.e., 19/01/2016). È possibile notare che tutti e tre gli scenari producono una riduzione media della temperatura dell'aria del dominio di calcolo pari a 0.02 °C.

Tabella 32. Confronto tra le temperature dello scenario di controllo e gli scenari di mitigazione per il giorno tipico invernale (i.e., 19/01/2016)

Ora	$\Delta T_{Baseline-TO1}$	$\Delta T_{Baseline-TO2}$	$\Delta T_{Baseline-TO3}$
00.00	0.02	0.02	0.02
01.00	0.04	0.04	0.02
02.00	0.04	0.04	0.02

03.00	0.03	0.04	0.02
04.00	0.04	0.04	0.02
05.00	0.02	0.03	0.01
06.00	0.04	0.04	0.02
07.00	0.04	0.05	0.03
08.00	0.02	0.02	0.02
09.00	0.02	0.02	0.01
10.00	0.05	0.05	0.01
11.00	0.02	0.02	0.01
12.00	-0.01	-0.01	0.01
13.00	-0.04	-0.04	0.01
14.00	0.00	0.00	0.01
15.00	0.03	0.02	0.02
16.00	0.03	0.02	0.02
17.00	0.04	0.03	0.03
18.00	0.03	0.03	0.02
19.00	0.03	0.03	0.02
20.00	0.03	0.03	0.02
21.00	0.03	0.03	0.02
22.00	0.02	0.02	0.01
23.00	0.02	0.02	0.02
Media	**0.02**	**0.02**	**0.02**

Per lo scenario TO1, che prevede l'applicazione di un *living wall* in un *canyon* parallelo alla direzione principale del vento, è possibile notare che la maggiore riduzione della temperatura avviene durante le ore notturne e le prime ore del mattino (i.e., dalle ore 01.00 alle ore 07.00), fino ad un massimo di 0.05 °C e durante il pomeriggio e la sera (i.e., dalle ore 15.00 alle ore 21.00), durante le ore centrali della giornata (i.e., dalle ore 12.00 alle ore 14.00), si riscontra un aumento della temperatura fino a 0.04 °C.
La Figura 112 mostra la differenza tra la temperatura dell'aria all'altezza del pedone nel caso dello scenario TO1 e quello *baseline* alle ore 10.00 del 19/01/2016, ovvero nell'ora di maggiore mitigazione dell'isola di calore.

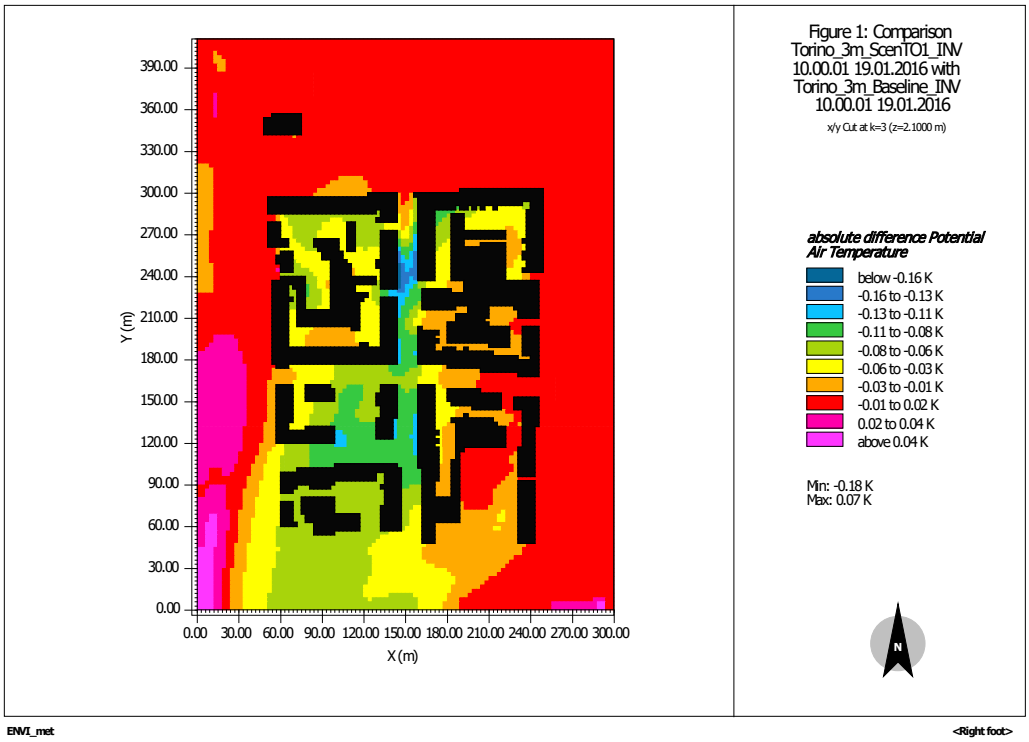


Figura 112. Confronto tra temperature dell'aria all'altezza del pedone (i.e., 2.1 m) tra scenario TO1 e scenario *baseline* ore 10.00 del 19/01/2016

In Figura 112 è possibile notare come la differenza di temperatura sia maggiore nella parte superiore del *canyon* urbano in cui è stato applicato il *living wall*. In tale zona la temperatura diminuisce sino ad un massimo di 0.18 °C, quasi un ordine di grandezza rispetto alla media riportata in Tabella 32, e coincide con quella in cui il *canyon* è meno aperto. Questo significa che l'effetto dell'installazione dei *living wall* in *canyon* urbano dipende da elementi di contesto. In generale, si nota che tutto il *canyon* di installazione del *living wall* presenta valori di riduzione della temperatura dell'aria decisamente superiori alla riduzione media relativa all'intero dominio di calcolo (i.e., 0.02 °C).

Anche per lo scenario TO2, che prevede l'installazione di una *green façade* in un *canyon* parallelo alla direzione principale del vento, è possibile notare che la maggiore riduzione della temperatura avviene durante le ore notturne e le prime ore del mattino (i.e., dalle ore 01.00 alle ore 07.00), fino ad un massimo di 0.05 °C e durante il tardo pomeriggio e la sera (i.e., dalle ore 17.00 alle ore 21.00); durante le ore centrali della giornata (i.e., dalle ore 12.00 alle ore 14.00), si riscontra un aumento della temperatura fino a 0.04 °C.

La Figura 113 mostra la differenza tra la temperatura dell'aria all'altezza del pedone nel caso dello scenario TO2 e quello *baseline* alle ore 10.00 del 19/01/2016, ovvero nell'ora di maggiore mitigazione dell'isola di calore. Analogamente a quanto già osservato per lo scenario TO1, la differenza di temperatura è maggiore nella parte superiore del *canyon* urbano in cui è stato applicato la tecnologia verde, in questo caso la *green façade*. Anche con lo scenario TO2, in tale zona la temperatura diminuisce sino ad un massimo di 0.18 °C, quasi un ordine di grandezza rispetto alla media riportata in Tabella 32, e coincide con quella in cui il *canyon* è meno aperto. In generale, anche in questo caso si nota che tutto il *canyon* di installazione della *green façade* presenta valori di riduzione della temperatura dell'aria decisamente superiori alla riduzione media relativa all'intero dominio di calcolo (i.e., 0.02 °C).

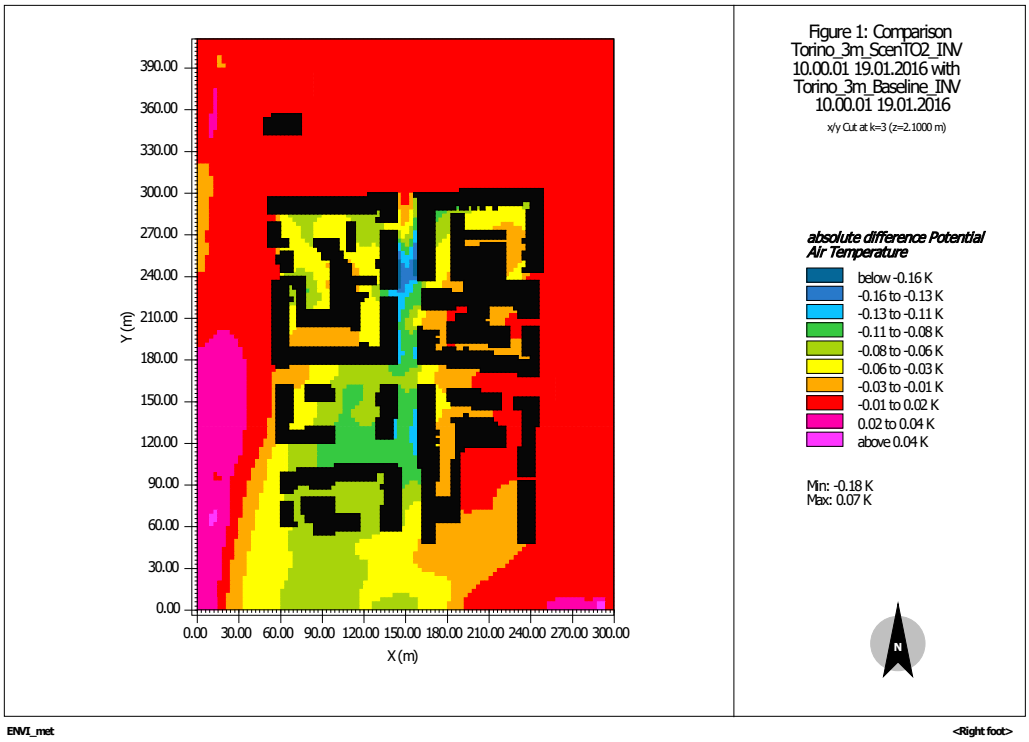


Figura 113. Confronto tra temperature dell'aria all'altezza del pedone (i.e., 2.1 m) tra scenario TO2 e scenario *baseline* ore 10.00 del 19/01/2016

Infine, è stato analizzato il caso dell'applicazione dello scenario TO3 che prevede l'applicazione di un *living wall* in un *canyon* ortogonale alla direzione principale del vento. In Tabella 32, è possibile notare che la maggiore riduzione avviene durante le ore notturne e le prime ore del mattino (i.e., dalle ore 00.00 alle ore 07.00), fino ad un massimo di 0.03 °C e durante il pomeriggio e la sera (i.e., dalle ore 15.00 alle ore 21.00).
La Figura 114 mostra la differenza tra la temperatura dell'aria all'altezza del pedone nel caso dello scenario TO3 e quello *baseline* alle ore 07.00 del 19/01/2016. Si osserva che l'effetto di riduzione della temperatura è meno diffuso nel domino di calcolo rispetto a quanto era apprezzabile negli scenari TO1 e TO2, ma nella zona di applicazione raggiunge valori più elevati: la massima riduzione è pari a 0.36 °C.

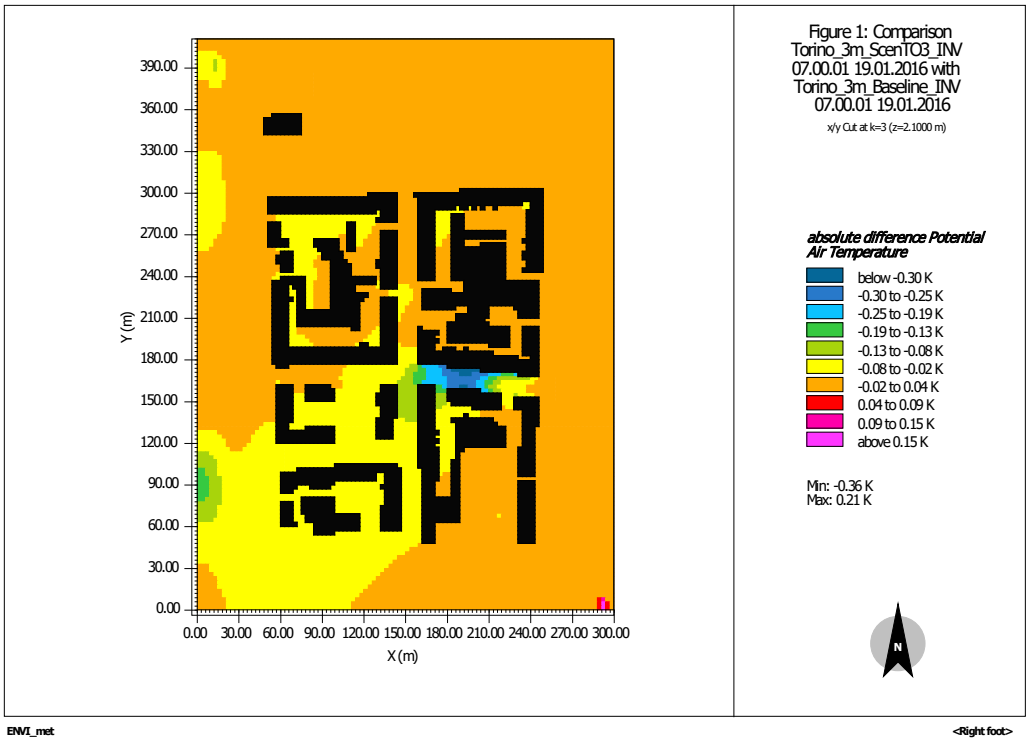


Figura 114. Confronto tra temperature dell'aria all'altezza del pedone (i.e., 2.1 m) tra scenario TO3 e scenario *baseline* ore 07.00 del 19/0212016

In sintesi, l'applicazione dei tre scenari di mitigazione ha mostrato che:

- l'applicazione di *living wall* e di *green façade* in un *canyon* urbano parallelo alla direzione principale del vento hanno effetti pressoché simili e comportano in media una riduzione della temperatura dell'aria su tutta l'area di studio di circa 0.02 °C; tutto il *canyon* di installazione presenta valori di mitigazione maggiori rispetto a quelli medi di tutta l'area: in media la mitigazione nel *canyon* è di circa 0.08 °C e 0.09 per l'installazione di un *living wall* e di una *green façade*, rispettivamente; localmente la riduzione di temperatura raggiunge valori massimi pari a 0.18 °C per entrambi gli scenari;
- l'applicazione di un *living wall* in un *canyon* urbano ortogonale alla direzione principale del vento comporta in media una riduzione della temperatura dell'aria su tutta l'area di studio che è del tutto simile a quanto osservato con l'installazione di un *living wall* in un *canyon* parallelo al vento (i.e., 0.02 °C), anche in questo caso si osservano riduzioni di temperatura più consistenti all'interno del *canyon,* con valori sia medi nel *canyon* sia massimi locali superiori rispetto al caso di *canyon* parallelo: 0.18 °C invece di 0.08 °C come media nel *canyon*, 0.36 °C invece di 0.18 °C come massima riduzione locale;

È stata valutata la variazione di CO_2 degli scenari di mitigazione relativi al 19/01/2016 alle ore 14.00, ovvero all'ora in cui la temperatura è massima poiché la combinazione tra inquinanti e temperatura può determinare i maggiori effetti sulla salute umana, rispetto allo scenario base.

La Figura 115 mostra la concentrazione del biossido di carbonio ad altezza pedonale relativa alle ore 14.00 e allo scenario base.

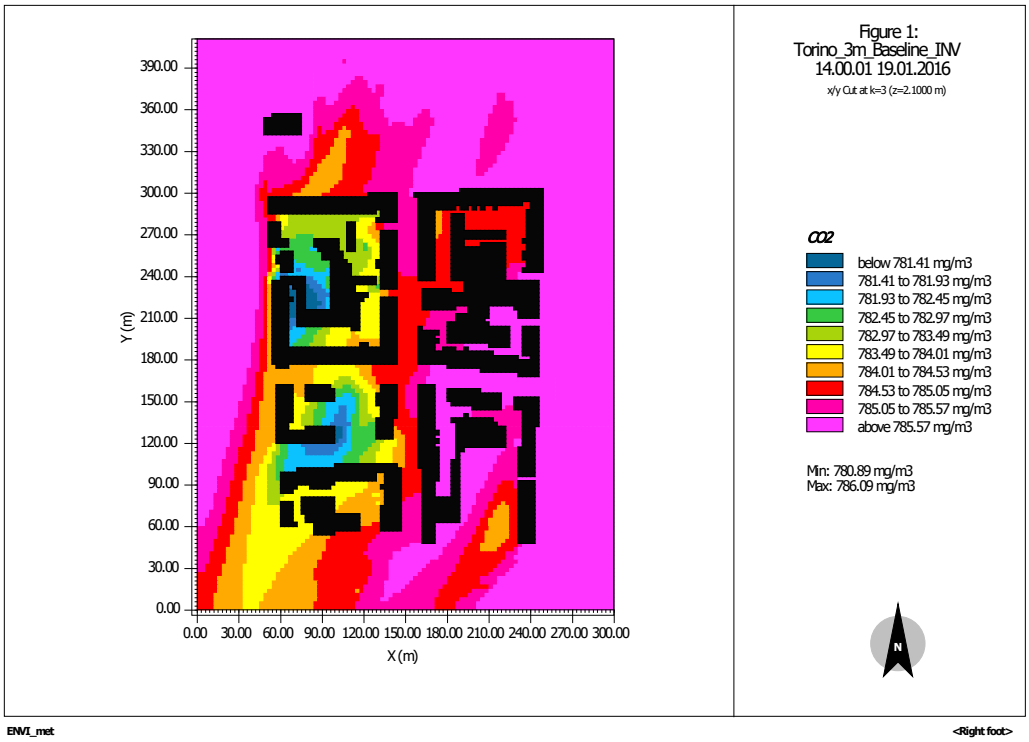


Figura 115. Concentrazione di CO_2 (mg/m^3) dell'aria all'altezza del pedone (i.e., 2.1 m) scenario *baseline* ore 14.00 del 19/01/2016

La concentrazione di CO_2 nell'intera area varia tra circa 781 e 786 mg/m^3. L'applicazione dello scenario di mitigazione TO1 dà origine ad una variazione esigua della concentrazione di biossido carbonio che raggiunge, al massimo, 0.08 mg/m^3 (Figura 116) se si ignorano gli effetti di bordo. Tale variazione equivale a circa il 0.01%. Pertanto, si può affermare che l'applicazione dello scenario TO1 non abbia effetti particolarmente rilevanti sulla concentrazione di CO_2.

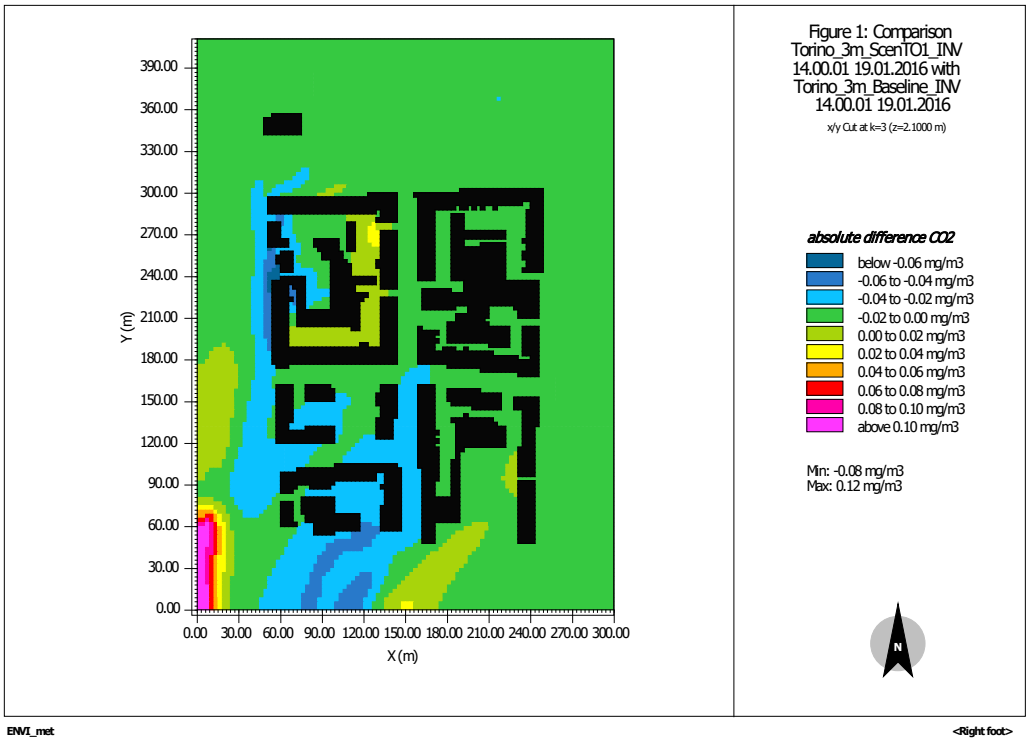


Figura 116. Confronto tra concentrazione di CO_2 (mg/m^3) dell'aria all'altezza del pedone (i.e., 2.1 m) tra scenario *baseline* e scenario TO1 ore 14.00 del 19/01/2016

Similmente è stata confrontata anche la concentrazione della CO_2 relativa agli scenari TO2 e TO3 (Figura 117 e Figura 118).

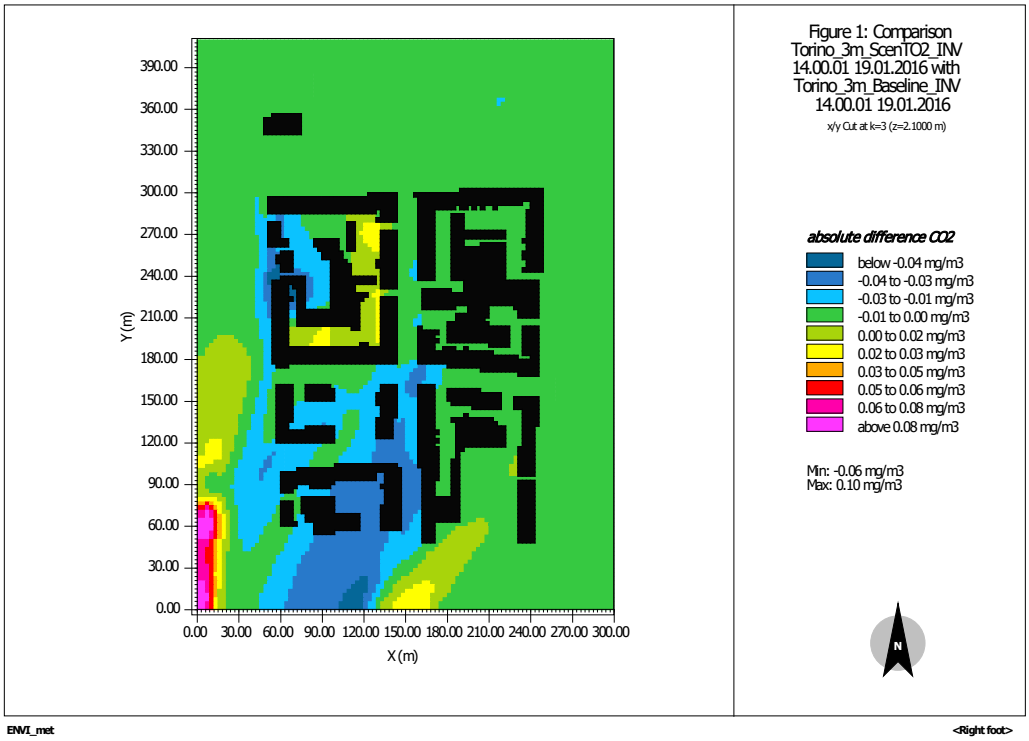


Figura 117. Confronto tra concentrazione di CO_2 (mg/m^3) dell'aria all'altezza del pedone (i.e., 2.1 m) tra scenario *baseline* e scenario TO2 ore 14.00 del 19/01/2016

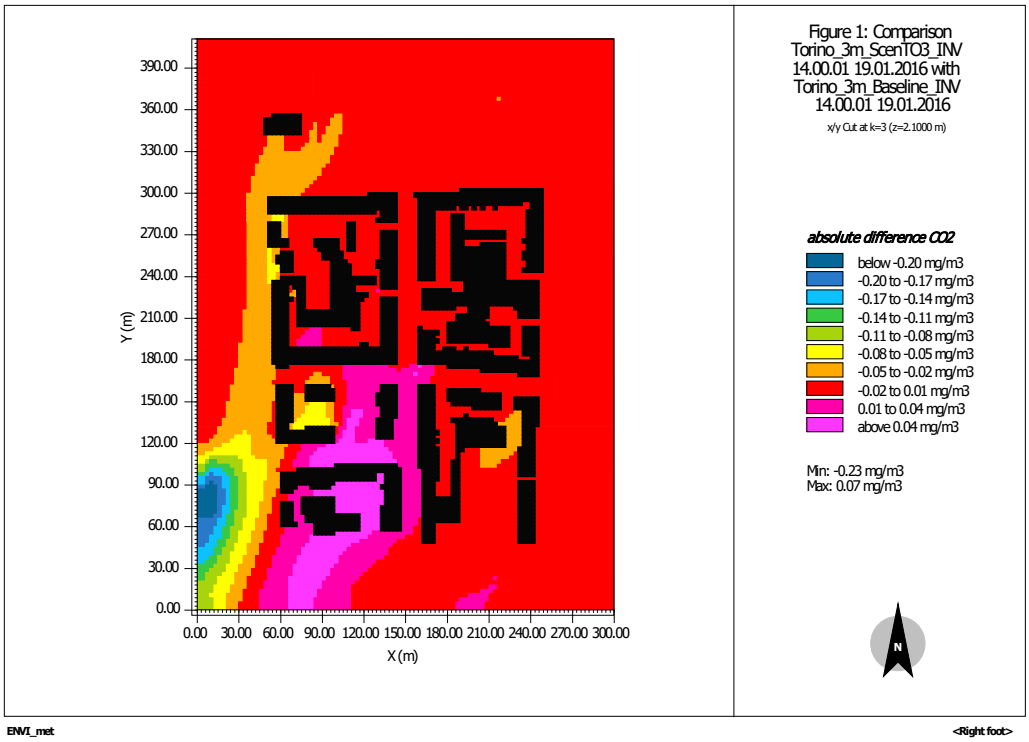


Figura 118. Confronto tra concentrazione di CO_2 (mg/m^3) dell'aria all'altezza del pedone (i.e., 2.1 m) tra scenario *baseline* e scenario TO3 ore 14.00 del 19/01/2016

La Figura 117 e la Figura 118 mostrano il confronto della concentrazione di CO_2 tra lo scenario di riferimento e gli scenari TO2 e TO3. In entrambi i casi, se si trascurano gli effetti di bordo, la variazione massima è contenuta e pari a circa 0.01%. In entrambi i casi la variazione della CO2 sembra seguire la direzione del vento ed essere concentrata nel blocco di edifici posto a Sud-Ovest.

7.2.3 Confronto tra le temperature dell'aria all'altezza dei pedoni relativi a scenari riferiti alla giornata tipica estiva (27/07/2014)

Le temperature puntuali dell'aria relative per ogni cella del modello e ad un'altezza di 2.1 m dal suolo sono state calcolate in ENVI-met e utilizzate per calcolare la media dell'intera area urbana oggetto di studio per le diverse ore del tipico giorno estivo, ovvero il 27/07/2014. La Figura 119 mostra come le temperature relative agli scenari di mitigazione ricalchino fedelmente l'andamento delle temperature dello scenario di controllo.

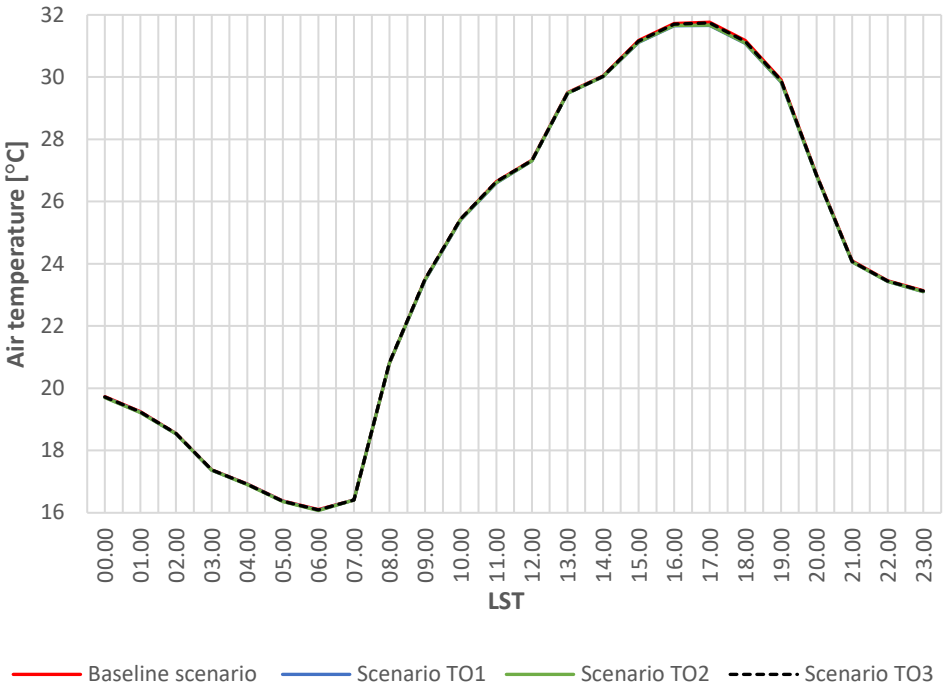


Figura 119. Temperature medie estive dell'aria (i.e., a 2.1 m dal suolo) calcolate per l'intera area urbana selezionata per il giorno tipico estivo (i.e., 27/07/2014)

La Tabella 33 mostra gli effetti della mitigazione dell'isola di calore urbana a seguito dell'applicazione dei tre scenari di mitigazione.

Tabella 33. Confronto tra le temperature dello scenario di controllo e gli scenari di mitigazione per il giorno tipico estivo (i.e., 27/07/2014)

Ora	$\Delta T_{Baseline-TO1}$	$\Delta T_{Baseline-TO2}$	$\Delta T_{Baseline-TO3}$
00.00	0.02	0.02	0.01
01.00	0.02	0.03	0.01
02.00	0.01	0.02	0.01
03.00	0.01	0.02	0.01
04.00	0.01	0.01	0.01
05.00	0.02	0.02	0.01
06.00	0.03	0.04	0.01
07.00	-0.01	-0.01	-0.01
08.00	0.00	0.00	-0.01
09.00	0.01	0.01	-0.01
10.00	0.02	0.02	-0.01
11.00	0.04	0.03	0.01
12.00	0.02	0.02	0.01
13.00	0.01	0.01	0.01
14.00	0.02	0.02	0.01
15.00	0.06	0.05	0.02
16.00	0.08	0.07	0.02
17.00	0.10	0.09	0.02

18.00	0.09	0.08	0.02
19.00	0.07	0.06	0.02
20.00	0.03	0.03	0.01
21.00	0.03	0.03	0.01
22.00	0.02	0.02	0.01
23.00	0.02	0.02	0.01
Media	**0.03**	**0.03**	**0.01**

È possibile notare che la maggiore mitigazione media è ottenuta con gli scenari in cui i *green wall* (*living wall* per lo scenario TO1 e *green façade* per lo scenario TO2) sono applicati in un *canyon* urbano parallelo alla direzione del vento: tale mitigazione media è pari a 0.02 °C. Per lo scenario TO1, la mitigazione è maggiore nel pomeriggio (i.e., almeno pari a 0.06 °C dalle 15.00 alle 19.00) e raggiunge un valore massimo di 0.10 °C alle 17.00. Un comportamento del tutto analogo è osservabile per lo scenario TO2, una mitigazione maggiore tra le 15.00 e le 19.00 (almeno pari a 0.05 °C), ed un valore massimo, pari a 0.09 °C, raggiunto alle 17.00.
Lo scenario TO3, invece, vede una mitigazione compresa tra 0.01 °C e 0.02 °C, con la mitigazione maggiore raggiunta alle 19.00, con l'eccezione del periodo compreso tra 07.00 e le 10.00, dove si osserva un aumento della temperatura media del dominio di calcolo rispetto alla *baseline* pari a 0.01 °C. La mitigazione media dello scenario TO3 è pari a 0.01 °C.
Di seguito sono stati investigati i comportamenti dei tre scenari di mitigazione dell'isola di calore urbana durante l'ora in cui maggiormente riducono la temperatura dell'aria a livello pedonale (i.e., ore 17.00 per TO1 e TO2, ore 19.00 per TO3) durante la giornata tipica estiva (i.e., 27/07/2014).

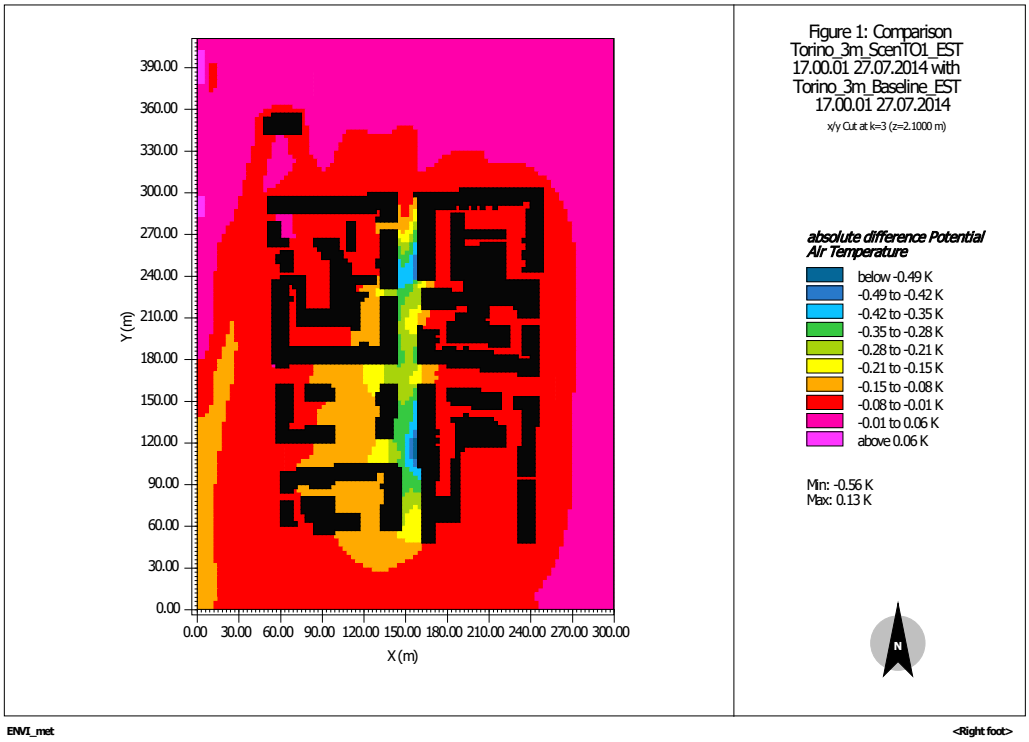


Figura 120. Confronto tra temperature dell'aria all'altezza del pedone (i.e., 2.1 m) tra scenario TO1 e scenario *baseline* ore 17.00 del 27/07/2014

In Figura 120, si nota che tutto il *canyon* di installazione del *living wall* presenta valori di riduzione delle temperatura dell'aria decisamente superiori alla riduzione media relativa all'intero dominio di calcolo (i.e., 0.03 °C), con una riduzione della temperatura, rispetto alla *baseline*, in media pari a 0.26 °C (Tabella 51) e che raggiunge un massimo di 0.56 °C nella parte inferiore del *canyon*. Si nota inoltre che zone limitrofe al *canyon*, in particolare a Ovest e a Sud-Ovest dello stesso, presentano una mitigazione maggiore rispetto alla media del

dominio di calcolo (i.e., tra 0.15 °C e 0.08 °C) e beneficiano quindi dell'effetto dovuto all'installazione del *living wall*.

La Figura 121 mostra che l'effetto dell'applicazione dello scenario TO2 è del tutto simile a TO1. Anche in questo caso tutto il *canyon* di installazione della *green façade* presenta valori di riduzione della temperatura dell'aria decisamente superiori a quella media relativa all'intero dominio di calcolo (i.e., 0.03 °C), con una riduzione della temperatura, rispetto alla *baseline*, in media pari a 0.26 °C (Tabella 51), toccando un massimo di 0.54 °C nella parte inferiore del *canyon*. Anche in questo caso, zone limitrofe al *canyon*, a Ovest e a Sud-Ovest dello stesso, presentano una mitigazione maggiore rispetto alla media (i.e., tra 0.12 °C e 0.06 °C) e beneficiano quindi dell'effetto dovuto all'installazione della *green façade*.

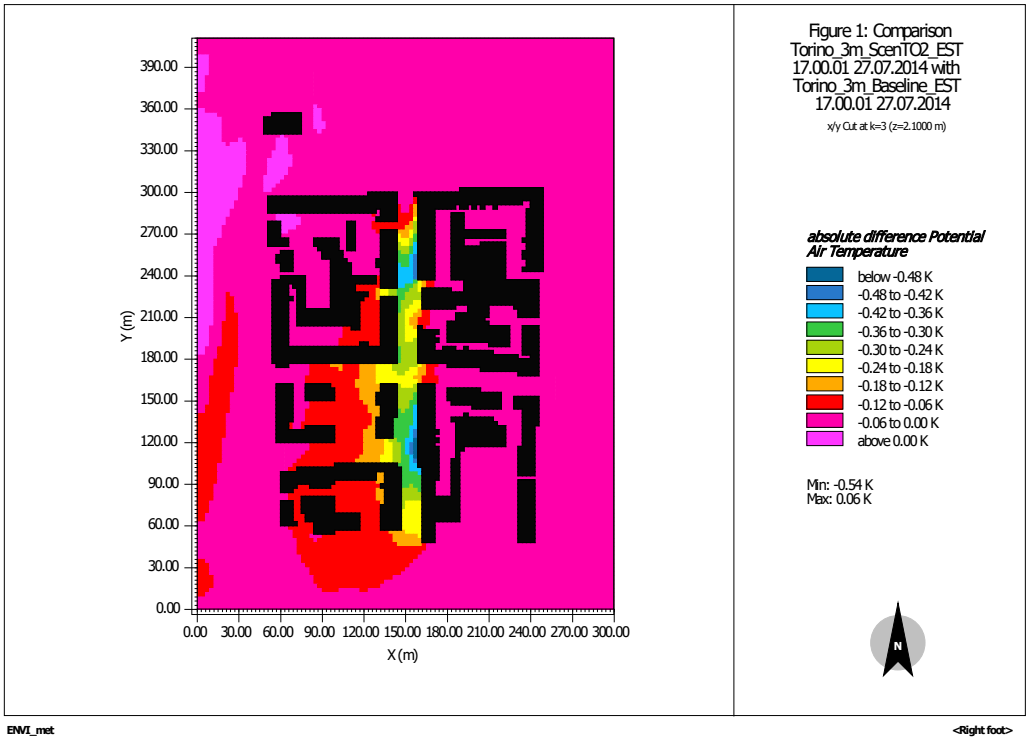


Figura 121. Confronto tra temperature dell'aria all'altezza del pedone (i.e., 2.1 m) tra scenario TO2 e scenario *baseline* ore 17.00 del 27/07/2014

In Figura 122 è possibile notare che applicando il *living wall* in un *canyon* perpendicolare alla direzione principale del vento, l'effetto di mitigazione maggiore continua ad essere osservato all'interno del *canyon* di applicazione: la riduzione media nel *canyon* è pari a 0.16 °C (Tabella 51) e raggiunge un massino di riduzione della temperatura pari a 0.29 °C. Rispetto a quanto osservato con gli altri due scenari, tuttavia, la mitigazione è più circoscritta e tende ad espandersi di meno alle zone circostanti, in particolare, si espande a Sud del *canyon*.

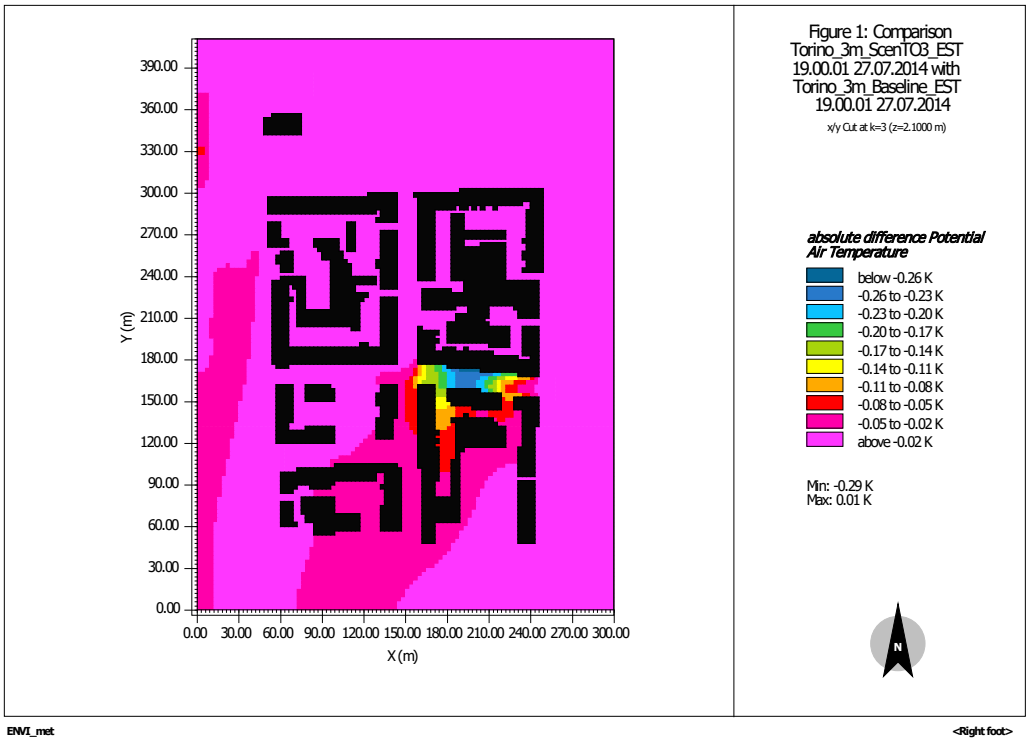


Figura 122. Confronto tra temperature dell'aria all'altezza del pedone (i.e., 2.1 m) tra scenario TO3 e scenario *baseline* ore 19.00 del 27/07/2014

In sintesi, l'applicazione dei tre scenari di mitigazione ha mostrato che:
- l'applicazione di *living wall* e di *green façade* in un *canyon* urbano parallelo alla direzione principale del vento ha effetti pressoché simili e comporta in media una riduzione della temperatura dell'aria su tutta l'area di studio di circa 0.03 °C; tutto il *canyon* di installazione presenta valori di mitigazione maggiori rispetto a quelli medi relativi all'intera area: in media la mitigazione nel *canyon* è di circa 0.26 °C per entrambi gli scenari e localmente arriva fino a 0.56 °C e 0.54 °C per l'installazione di un *living wall* e di una *green façade*, rispettivamente;
- l'applicazione di un *living wall* in un *canyon* urbano ortogonale alla direzione principale del vento comporta in media una riduzione della temperatura dell'aria su tutta l'area di studio che è leggermente inferiore a quanto osservato con l'installazione di un *living wall* in un *canyon* parallelo al vento (i.e., 0.02 °C invece che 0.03 °C), anche in questo caso si osservano riduzioni di temperatura più consistenti all'interno del *canyon*, ma i valori sia medi nel *canyon* sia massimi locali sono inferiori rispetto al caso di *canyon* parallelo: 0.16 °C invece di 0.26 °C come media nel *canyon*, 0.29 °C invece di 0.56 °C come massimo locale.

È stata valutata la variazione di CO_2 degli scenari di mitigazione relativi al 27/07/2014 alle ore 17.00, ovvero all'ora in cui la temperatura è massima poiché la combinazione tra inquinanti e temperatura può determinare i maggiori effetti sulla salute umana, rispetto allo scenario base.
La Figura 123 mostra la concentrazione del biossido di carbonio ad altezza pedonale relativa alle ore 17.00 e allo scenario base. La concentrazione di CO_2 nell'intera area varia tra circa 718 e 731 mg/m^3.

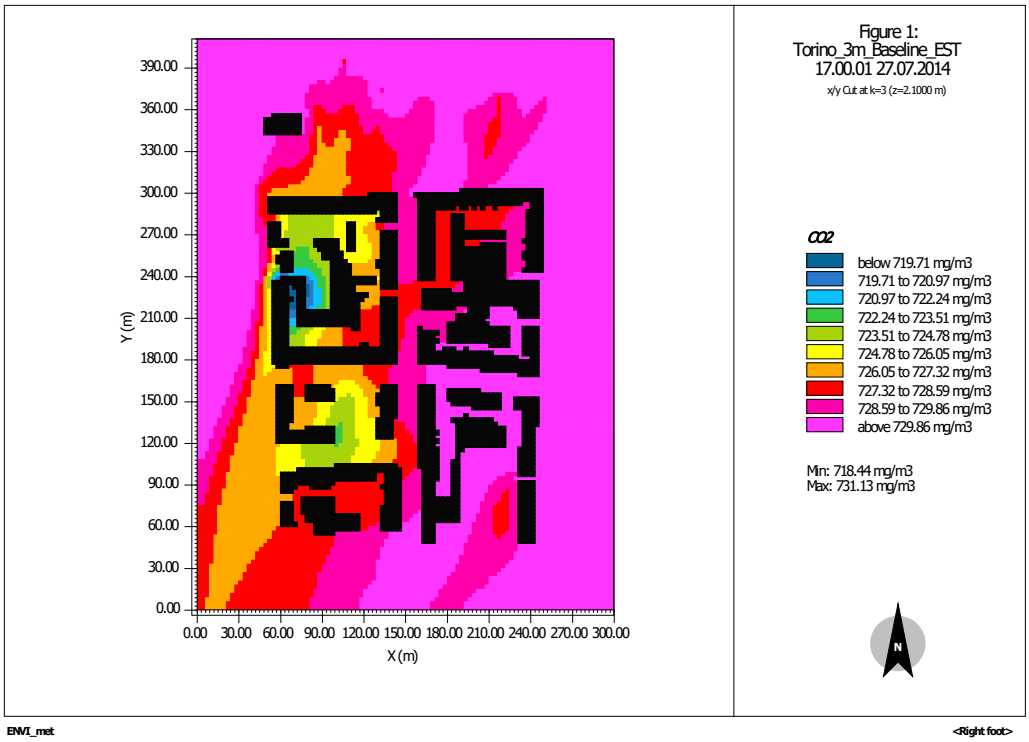


Figura 123. Concentrazione di CO_2 (mg/m^3) dell'aria all'altezza del pedone (i.e., 2.1 m) scenario *baseline* ore 17.00 del 27/07/2014

L'applicazione dello scenario di mitigazione TO1 dà origine ad una variazione esigua della concentrazione di biossido carbonio che raggiunge, al massimo, 0.21 mg/m^3 (Figura 124) se si ignorano gli effetti di bordo. Tale variazione equivale a circa lo 0.03%. Pertanto, si può affermare che l'applicazione dello scenario TO1 non abbia effetti particolarmente rilevanti sulla concentrazione di CO_2.

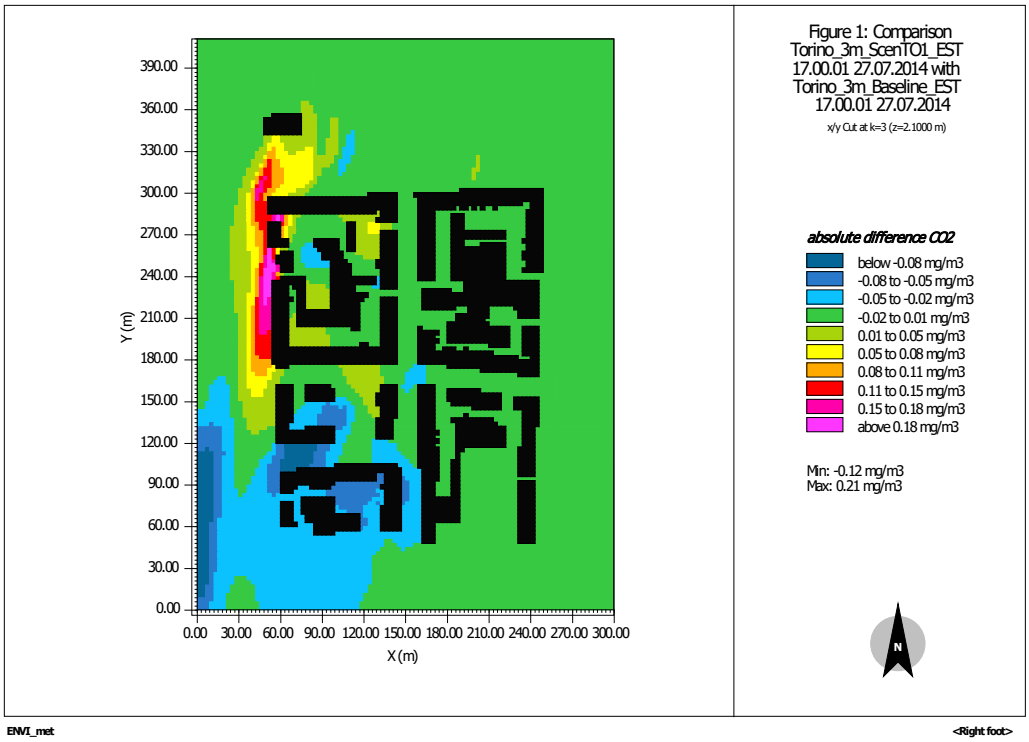


Figura 124. Confronto tra concentrazione di CO_2 (mg/m^3) dell'aria all'altezza del pedone (i.e., 2.1 m) tra scenario *baseline* e scenario TO1 ore 17.00 del 27/07/2014

Similmente è stata confrontata anche la concentrazione della CO_2 relativa agli scenari TO2 e TO3 (Figura 125 e Figura 126).

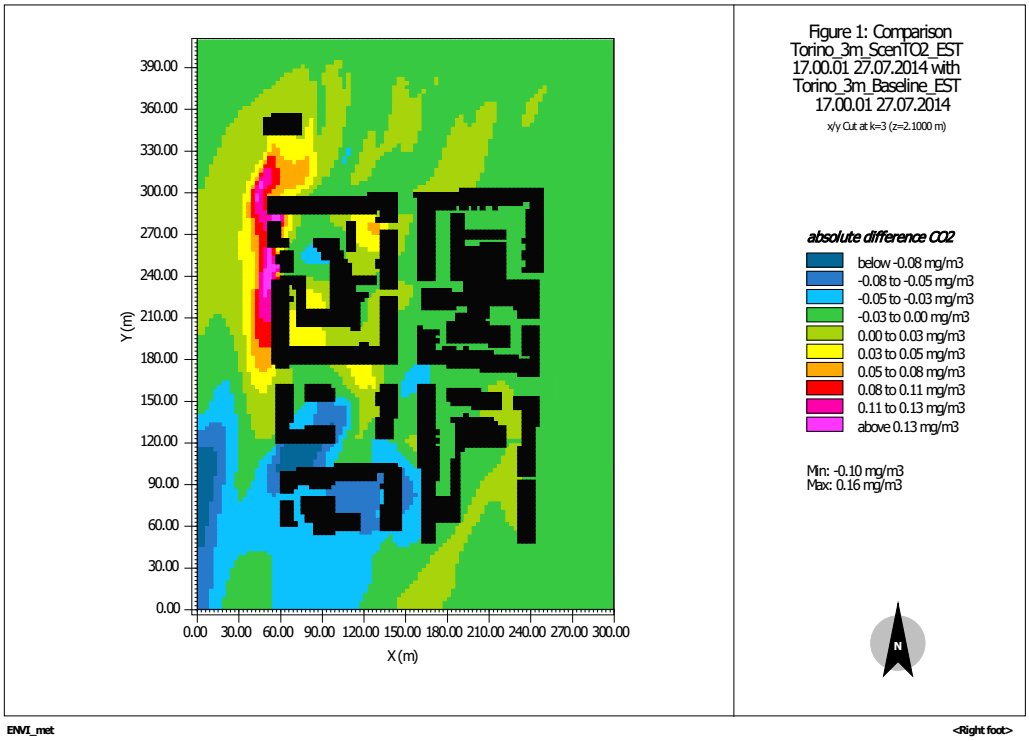


Figura 125. Confronto tra concentrazione di CO_2 (mg/m^3) dell'aria all'altezza del pedone (i.e., 2.1 m) tra scenario *baseline* e scenario TO2 ore 17.00 del 27/07/2014

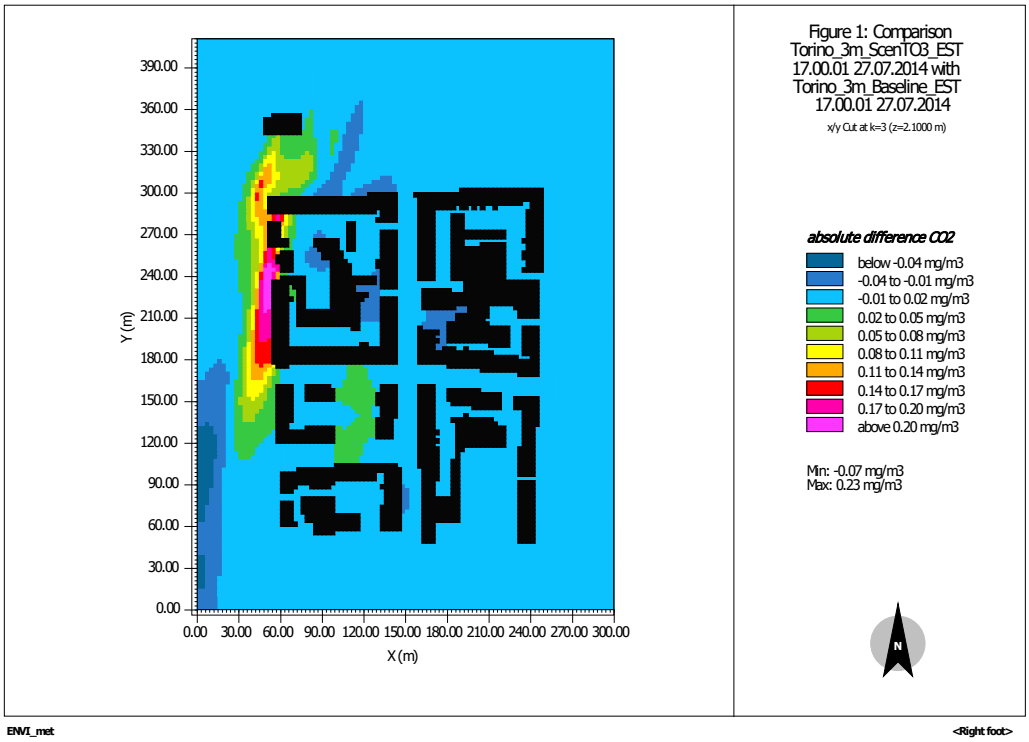


Figura 126. Confronto tra concentrazione di CO_2 (mg/m^3) dell'aria all'altezza del pedone (i.e., 2.1 m) tra scenario *baseline* e scenario TO3 ore 17.00 del 27/07/2014

La Figura 125 e la Figura 126 mostrano il confronto della concentrazione di CO_2 tra lo scenario di riferimento e gli scenari TO2 e TO3. In entrambi i casi, se si trascurano gli effetti di bordo, la variazione massima è contenuta e pari a circa 0.02% per TO2 e 0.03% per TO3. In entrambi i casi la variazione della CO2 sembra essere concentrata nel blocco di edifici posto a Nord-Ovest.

7.2.4 Confronto tra le temperature dell'aria all'altezza dei pedoni relativi a scenari riferiti alla giornata tipica con ondata di calore (07/07/2015)

Le temperature puntuali dell'aria relative per ogni cella del modello e ad un'altezza di 2.1 m dal suolo sono state calcolate in ENVI-met e utilizzate per calcolare la media dell'intera area urbana oggetto di studio per le diverse ore del tipico giorno con ondata di calore, ovvero il 07/07/2015. La Figura 127 mostra come le temperature relative agli scenari di mitigazione ricalchino fedelmente l'andamento delle temperature dello scenario di controllo.

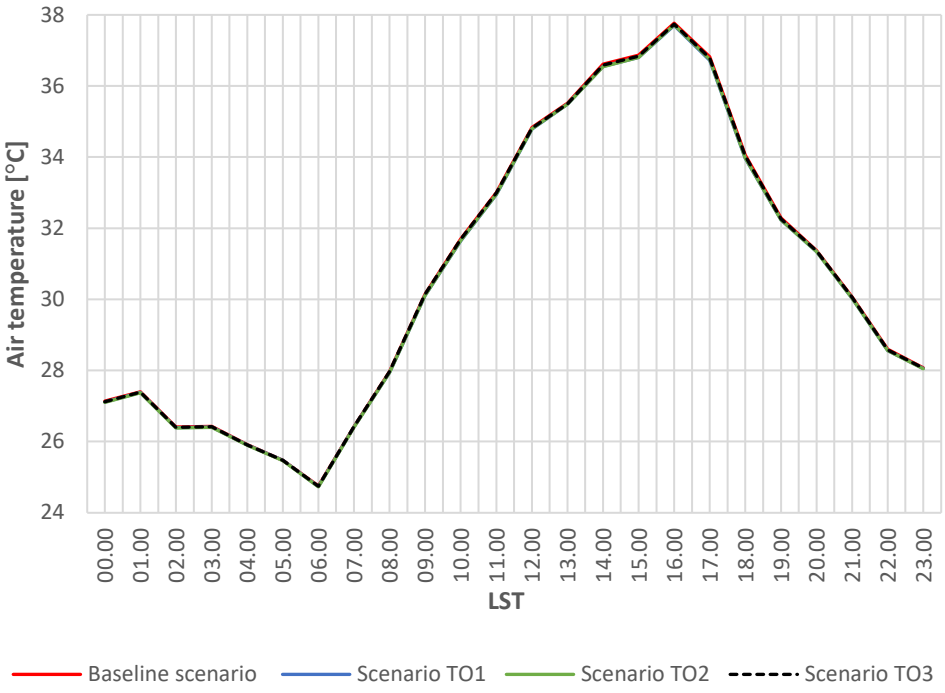


Figura 127. Temperature medie relative ad un'ondata di calore (i.e., a 2.1 m dal suolo) calcolate per l'intera area urbana selezionata per il giorno tipico con ondata di calore (i.e., 07/07/2015)

La Tabella 34 mostra gli effetti della mitigazione dell'isola di calore urbana a seguito dell'applicazione dei tre scenari di mitigazione.

Tabella 34. Confronto tra le temperature dello scenario di controllo e gli scenari di mitigazione per il giorno tipico con ondata di calore (i.e., 07/07/2015)

Ora	$\Delta T_{Baseline-TO1}$	$\Delta T_{Baseline-TO2}$	$\Delta T_{Baseline-TO3}$
00.00	0.03	0.03	0.01
01.00	0.03	0.03	0.01
02.00	0.02	0.03	0.01
03.00	0.02	0.03	0.01
04.00	0.01	0.01	0.00
05.00	0.00	0.01	0.00
06.00	0.01	0.03	0.01
07.00	0.02	0.02	0.00
08.00	0.03	0.03	0.00
09.00	0.04	0.03	0.00
10.00	0.05	0.04	0.00
11.00	0.06	0.05	0.01
12.00	0.04	0.04	0.02
13.00	0.03	0.03	0.02
14.00	0.06	0.07	0.02
15.00	0.06	0.06	0.03
16.00	0.07	0.04	0.03
17.00	0.10	0.06	0.03

18.00	0.09	0.08	0.03
19.00	0.05	0.05	0.02
20.00	0.02	0.03	0.01
21.00	0.03	0.03	0.01
22.00	0.03	0.03	0.01
23.00	0.02	0.03	0.01
Media	**0.04**	**0.04**	**0.01**

È possibile notare che la maggiore mitigazione media è ottenuta con gli scenari in cui i *green wall* (*living wall* per lo scenario TO1 e *green façade* per lo scenario TO2) sono applicati in un *canyon* urbano parallelo alla direzione del vento: tale mitigazione media è pari a 0.04 °C. Per lo scenario TO1, la mitigazione è maggiore nel pomeriggio (i.e., almeno pari a 0.05 °C dalle 14.00 alle 19.00) e raggiunge un valore massimo di 0.10 °C alle 17.00. Un comportamento del tutto analogo è osservabile per lo scenario TO2, una mitigazione maggiore tra le 15.00 e le 19.00 (almeno pari a 0.05 °C), ed un valore massimo, pari a 0.08 °C, raggiunto alle 18.00.
Lo scenario TO3, invece, vede una mitigazione compresa tra 0.00 °C e 0.03 °C, con la mitigazione maggiore raggiunta alle 17.00. Tra le 04.00 e le 10.00 la mitigazione è pressoché nulla. La mitigazione media dello scenario TO3 è pari a 0.01 °C.
Di seguito sono stati investigati i comportamenti dei tre scenari di mitigazione dell'isola di calore urbana durante l'ora in cui maggiormente riducono la temperatura dell'aria a livello pedonale (i.e., ore 17.00 per TO1 e TO3, ore 18.00 per TO2) durante la giornata tipica con ondata di calore (i.e., 07/07/2015).

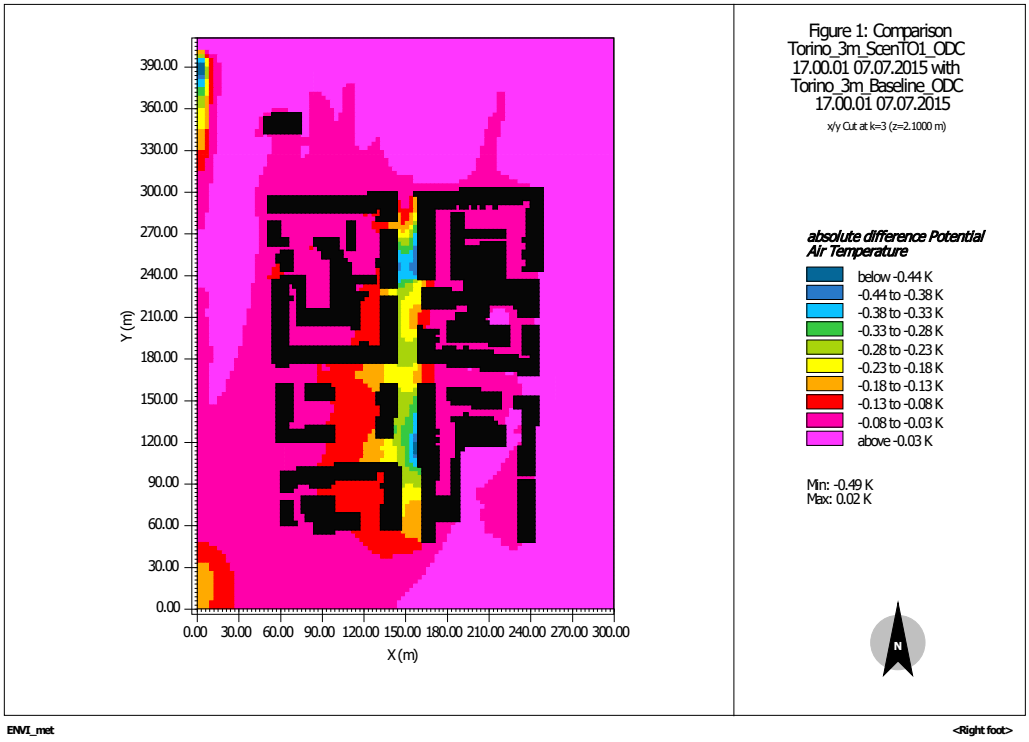


Figura 128. Confronto tra temperature dell'aria all'altezza del pedone (i.e., 2.1 m) tra scenario TO1 e scenario *baseline* ore 17.00 del 07/07/2015

In Figura 128, si nota che tutto il *canyon* di installazione del *living wall* presenta valori di riduzione della temperatura dell'aria decisamente superiori alla riduzione media relativa all'intero dominio di calcolo (i.e., 0.04 °C), con una riduzione della temperatura, rispetto alla *baseline*, in media pari a 0.23 °C e che raggiunge un massimo di 0.49 °C nella parte inferiore del *canyon*. Si nota inoltre che zone limitrofe al *canyon*, in particolare a Ovest e a Sud-Ovest dello stesso, presentano una mitigazione maggiore rispetto alla media del dominio di calcolo (i.e., tra 0.13 °C e 0.08 °C) e beneficiano quindi dell'effetto dovuto all'installazione del *living wall*.

La Figura 129 mostra che l'effetto dell'applicazione dello scenario TO2 è del tutto simile a TO1. Anche in questo caso tutto il *canyon* di installazione della *green façade* presenta valori di riduzione della temperatura dell'aria decisamente superiori a quella media relativa all'intero dominio di calcolo (i.e., 0.04 °C), con una riduzione della temperatura, rispetto alla *baseline*, in media pari a 0.22 °C, toccando un massimo di 0.48 °C nella parte inferiore del *canyon*. Anche in questo caso, zone limitrofe al *canyon*, a Ovest e a Sud-Ovest dello stesso, presentano una mitigazione maggiore rispetto alla media (i.e., tra 0.14 °C e 0.09 °C) e beneficiano quindi dell'effetto dovuto all'installazione della *green façade*.

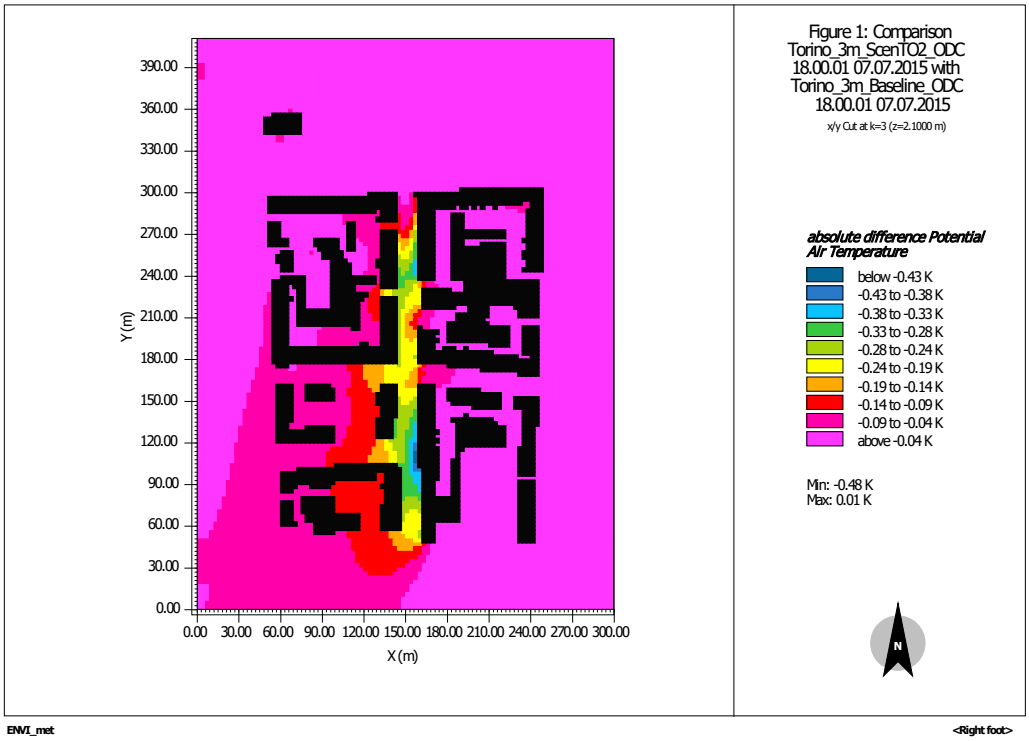


Figura 129. Confronto tra temperature dell'aria all'altezza del pedone (i.e., 2.1 m) tra scenario TO2 e scenario *baseline* ore 18.00 del 07/07/2015

In Figura 130 è possibile notare che applicando il *living wall* in un *canyon* perpendicolare alla direzione principale del vento, l'effetto di mitigazione maggiore continua ad essere osservato all'interno del *canyon* di applicazione: la riduzione media nel *canyon* è pari a 0.13 °C e raggiunge un massino di riduzione della temperatura pari a 0.22 °C. Rispetto a quanto osservato con gli altri due scenari, tuttavia, la mitigazione è più circoscritta e tende ad espandersi di meno alle zone circostanti.

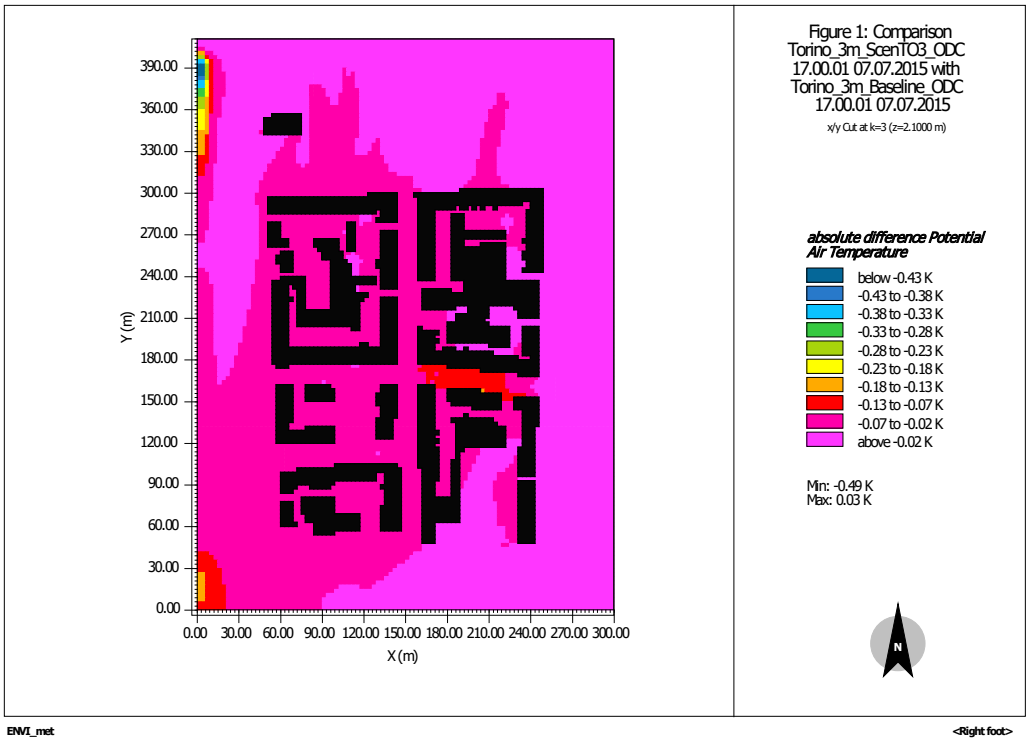


Figura 130. Confronto tra temperature dell'aria all'altezza del pedone (i.e., 2.1 m) tra scenario TO3 e scenario *baseline* ore 17.00 del 07/07/2015

In sintesi, l'applicazione dei tre scenari di mitigazione ha mostrato che:
- l'applicazione di *living wall* e di *green façade* in un *canyon* urbano parallelo alla direzione principale del vento ha effetti pressoché simili e comporta in media una riduzione della temperatura dell'aria su tutta l'area di studio di circa 0.04 °C; tutto il *canyon* di installazione presenta valori di mitigazione maggiori rispetto ai valori medi relativi all'intera area: in media la mitigazione nel canyon è di circa 0.23 °C per TO1 e 0.22 per TO2 e localmente arriva fino a 0.49 °C e 0.48 °C per l'installazione di un *living wall* e di una *green façade*, rispettivamente;
- l'applicazione di un *living wall* in un *canyon* urbano ortogonale alla direzione principale del vento comporta in media una riduzione della temperatura dell'aria su tutta l'area di studio che è inferiore a quanto osservato con l'installazione di un *living wall* in un *canyon* parallelo al vento (i.e., 0.01 °C invece che 0.04 °C), anche in questo caso si osservano riduzioni di temperatura più consistenti all'interno del *canyon*, ma i valori sia medi nel *canyon* sia massimi locali sono inferiori rispetto al caso di *canyon* parallelo: 0.13 °C invece di 0.23 °C come media nel *canyon*, 0.22 °C invece di 0.49 °C come massimo locale.

Anche per la giornata tipica con ondata di calore è stata valutata la variazione di CO_2 degli scenari di mitigazione relativi al 07/07/2017 alle ore 16.00, ovvero all'ora in cui la temperatura è massima poiché la combinazione tra inquinanti e temperatura può determinare i maggiori effetti sulla salute umana, rispetto allo scenario base.
La Figura 131 mostra la concentrazione del biossido di carbonio ad altezza pedonale relativa alle ore 16.00 e allo scenario base. La concentrazione di CO_2 nell'intera area varia tra circa 700 e 708 mg/m^3.
L'applicazione dello scenario di mitigazione TO1 dà origine ad una variazione esigua della concentrazione di biossido carbonio che raggiunge, al massimo, 0.23 mg/m^3 (Figura 132) se si ignorano gli effetti di bordo. Tale variazione equivale a circa lo 0.03%. Pertanto, si può affermare che l'applicazione dello scenario TO1 non abbia effetti particolarmente rilevanti sulla concentrazione di CO_2.

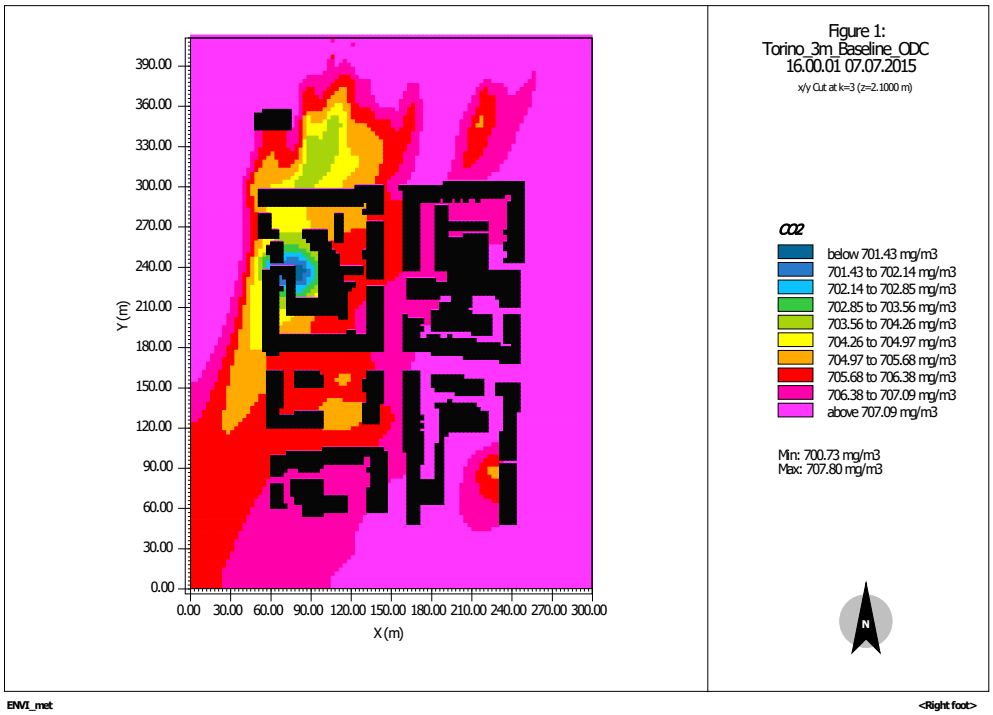


Figura 131. Concentrazione di CO_2 (mg/m^3) dell'aria all'altezza del pedone (i.e., 2.1 m) scenario *baseline* ore 16.00 del 07/07/2015

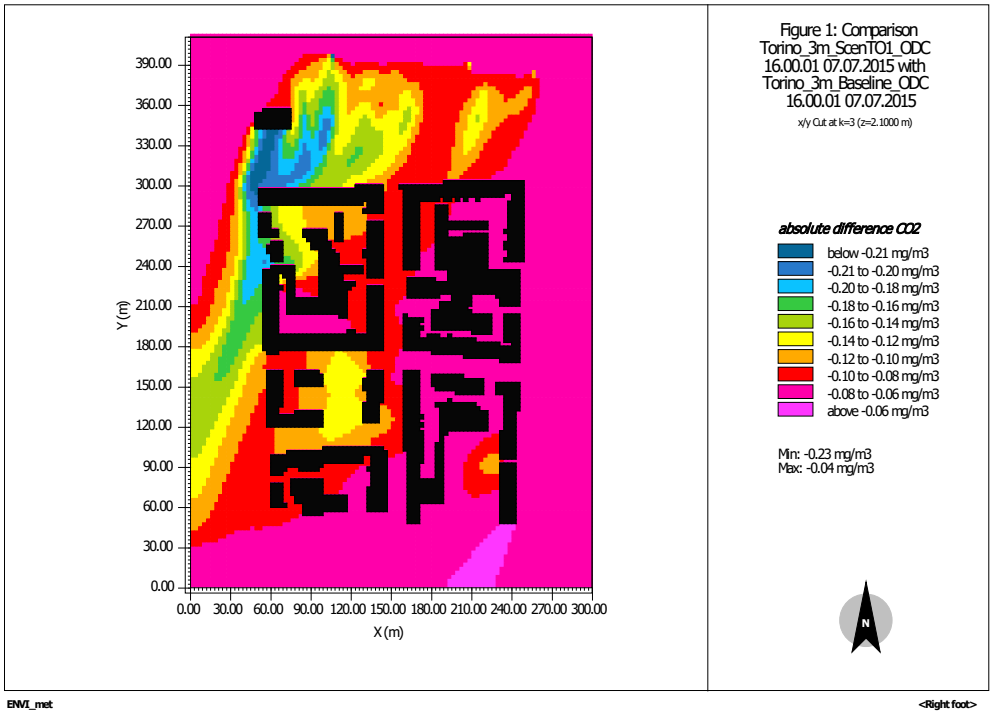


Figura 132. Confronto tra concentrazione di CO_2 (mg/m^3) dell'aria all'altezza del pedone (i.e., 2.1 m) tra scenario *baseline* e scenario TO1 ore 16.00 del 07/07/2015

Similmente è stata confrontata anche la concentrazione della CO_2 relativa agli scenari TO2 e TO3 (Figura 133 e Figura 134).

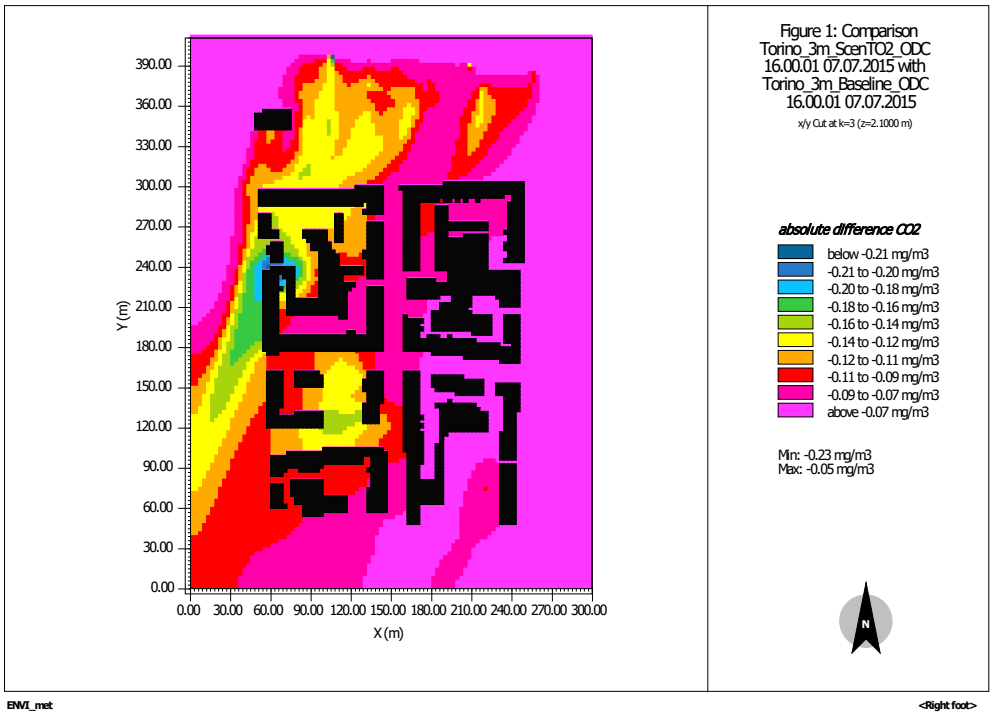


Figura 133. Confronto tra concentrazione di CO_2 (mg/m^3) dell'aria all'altezza del pedone (i.e., 2.1 m) tra scenario *baseline* e scenario TO2 ore 16.00 del 07/07/2015

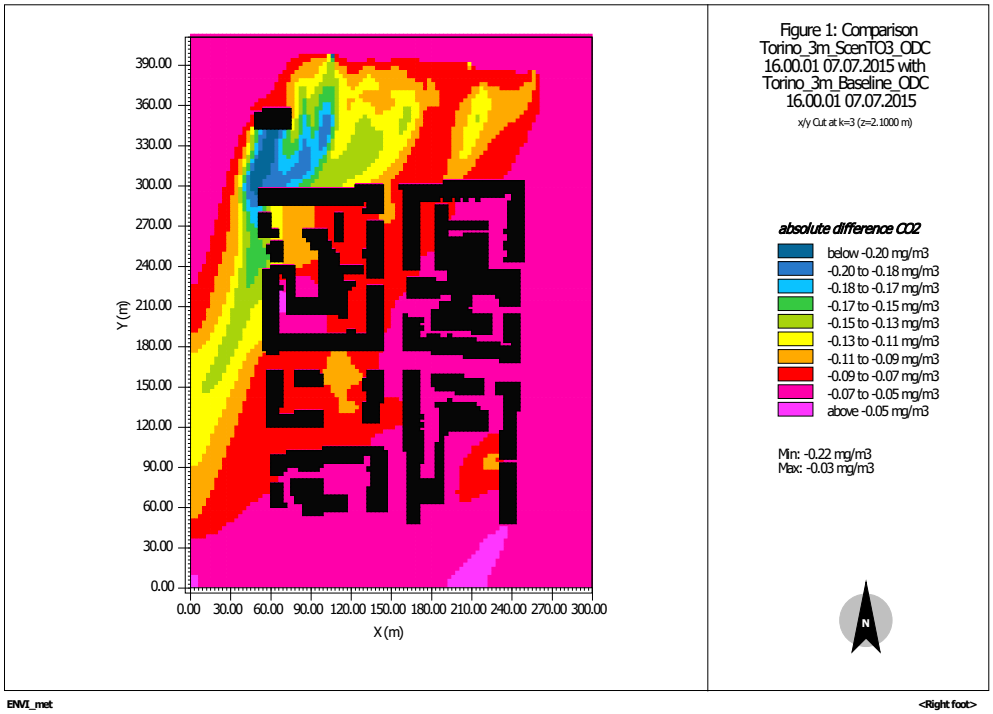


Figura 134. Confronto tra concentrazione di CO_2 (mg/m^3) dell'aria all'altezza del pedone (i.e., 2.1 m) tra scenario *baseline* e scenario TO3 ore 16.00 del 07/07/2015

La Figura 133 e la Figura 134 mostrano il confronto della concentrazione di CO_2 tra lo scenario di riferimento e gli scenari TO2 e TO3. In entrambi i casi, se si trascurano gli effetti di bordo, la variazione massima è contenuta e pari a circa 0.03% per entrambi gli scenari. In entrambi i casi la variazione della CO_2 sembra essere concentrata nel blocco di edifici posto a Nord-Ovest.

7.3 Milano

7.3.1 Scenari *baseline*

Gli *output* delle simulazioni ENVI-met sono stati analizzati rispetto sia alle temperature registrate in ambiente urbano sia rispetto a quelle registrate in ambito rurale. Le temperature simulate sono state considerate ad un'altezza di 2.1 m sul livello del terreno, ovvero ad un'altezza molto simile rispetto a quella reale alla quale si trova la centralina da cui sono stati registrati i dati meteorologici utilizzati per il confronto delle temperature dell'aria. Di seguito sono riportate le temperature relative alle tre giornate significative (Figura 150-Figura 152).

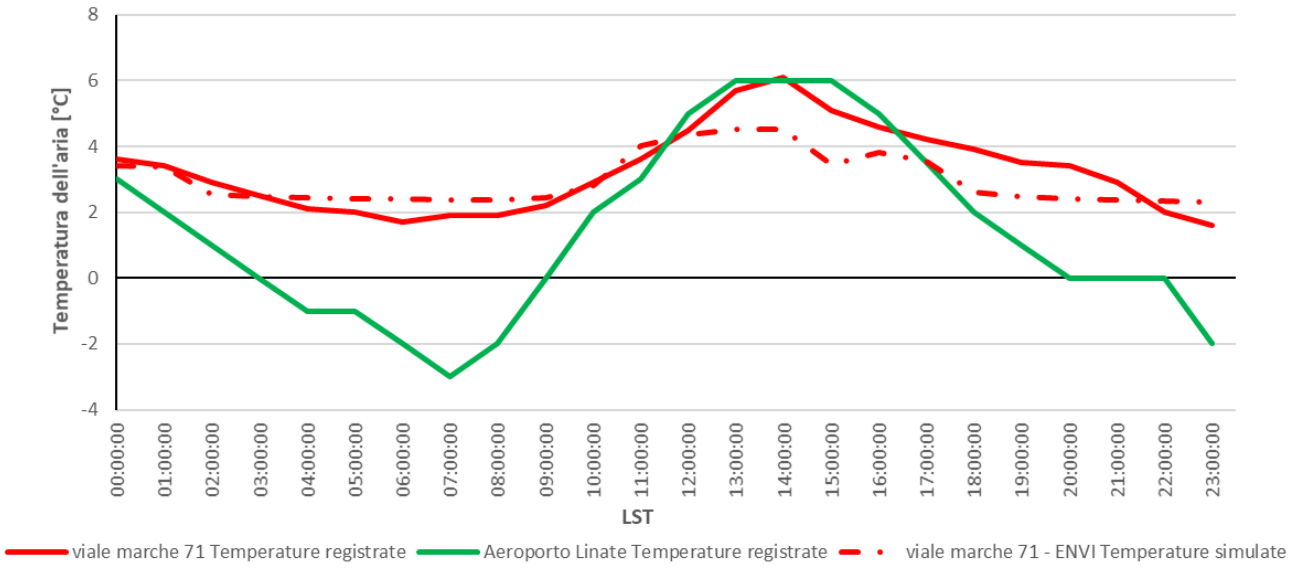


Figura 135. Temperature dell'aria registrate e simulate in viale Marche 71 relative al giorno tipico invernale (i.e., 14/12/2018)

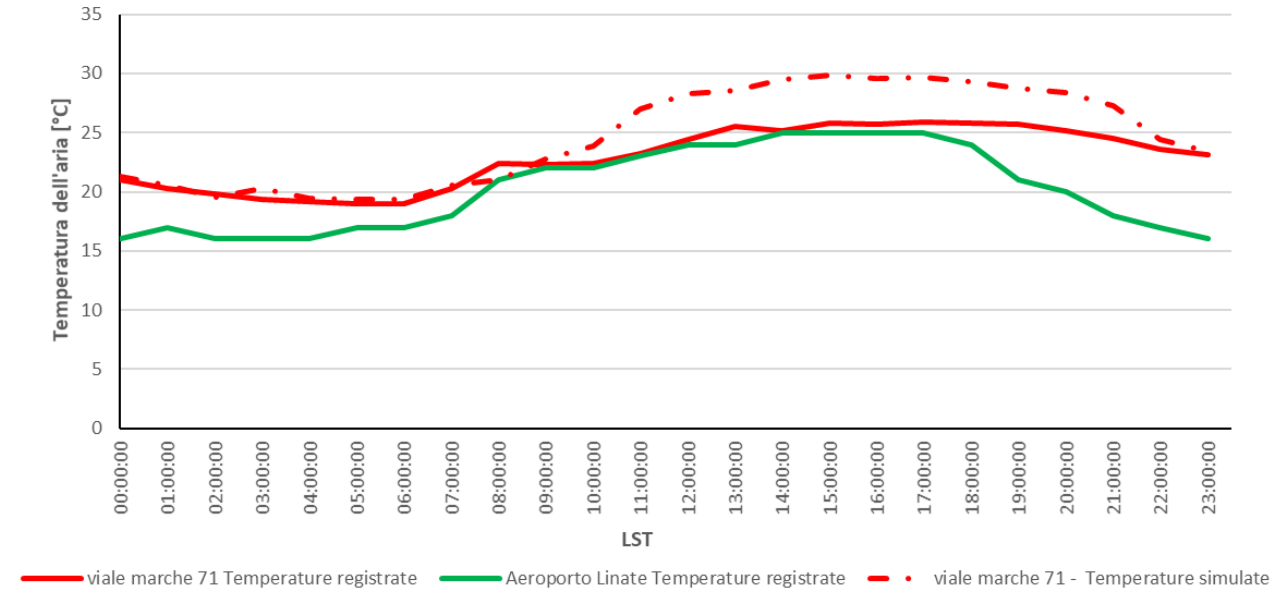


Figura 136. Temperature dell'aria registrate e simulate in viale Marche 71 relative al giorno tipico estivo (i.e., 19/06/2015)

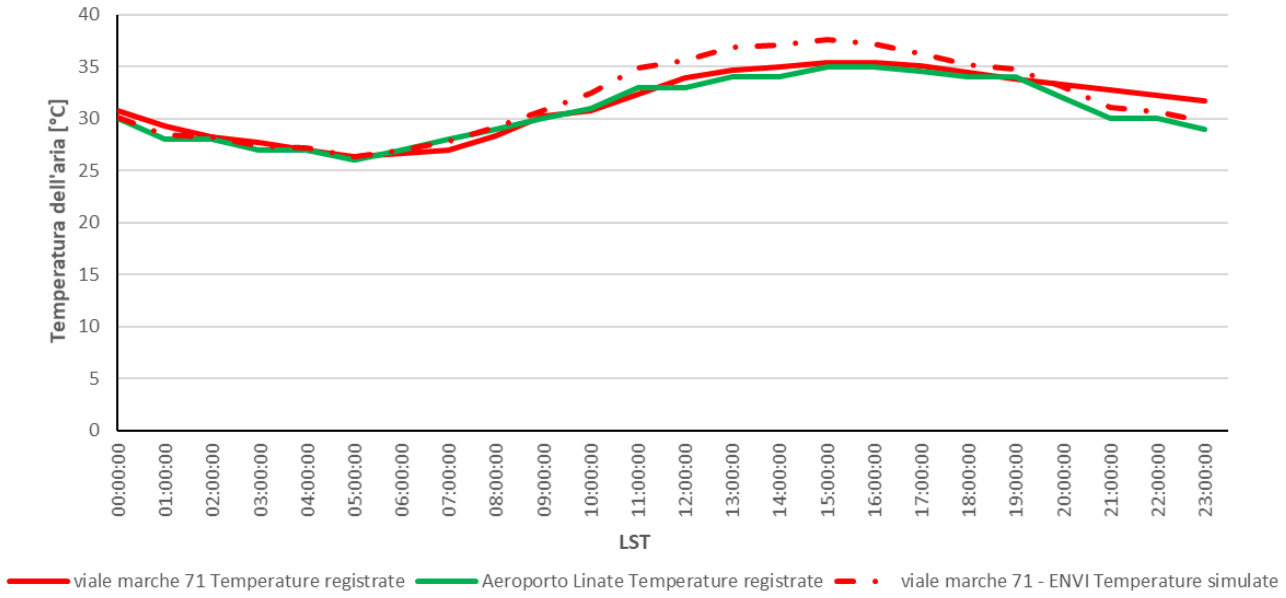


Figura 137. Temperature dell'aria registrate e simulate in viale Marche 71 relative al giorno tipico con ondata di calore (i.e., 07/07/2015)

È possibile notare come le temperature simulate dell'aria ricalchino l'andamento delle temperature rurali, usate per forzare il modello ENVI-met, nelle tre giornate tipiche. La Tabella 35 mostra per ciascuna delle tre giornate tipo gli errori calcolati tra le temperature registrate e le temperature simulate così come anche la variazione tra temperature massime registrate e simulate.

Tabella 35. Errori tra temperature registrate e temperature simulate relative a viale Marche 71

	Mean Absolute Error (MAE)	Root Mean Square Error (RMSE)	ΔT temperature massime
Giornata tipica invernale	0.61 °C	0.76 °C	1.57 °C [1]
Giornata tipica estiva	1.93 °C	2.46 °C	-3.98 °C [2]
Giornata tipica con ondata di calore	1.13 °C	1.36 °C	-2.18 °C [3]

[1] La temperatura massima registrata corrisponde alle ore 14.00 del 14/12/2018, mentre la temperatura massima simulata corrisponde alle ore 13.00. La differenza tra le temperature massime è pari a 1.57 °C, mentre alle ore 13.00 e alle ore 14.00 le differenze tra temperature registrate e simulate sono rispettivamente pari a 1.17 °C e 1.60 °C

[2] La temperatura massima registrata corrisponde alle ore 17.00 del 19/06/2015, mentre la temperatura massima simulata corrisponde alle ore 15.00. La differenza tra le temperature massime è pari a -3.98 °C, mentre alle ore 17.00 e alle ore 15.00 le differenze tra temperature registrate e simulate sono rispettivamente pari a -3.78 °C e -4.08 °C

[3] La temperatura massima registrata corrisponde alle ore 15.00 del 07/07/2015, così come la temperatura massima simulata

I dati presenti in Tabella 35 sono stati confrontati con quelli riportati in Figura 74, ovvero quelli relativi ai valori RMSE e MAE calcolati da studi presenti in letteratura. Dal confronto risulta che per la giornata tipica invernale, i valori di RMSE e MAE del caso di studio di Milano sono inferiori rispetto a quelli rappresentati in Figura 74, risultando più accurati rispetto ad altri studi di letteratura. Invece, per quel che riguarda i valori relativi alla giornata tipica estiva e tipica con ondata di calore, i valori trovati e riportati in Tabella 35 sono compatibili con quelli riportati in Figura 74. Pertanto, i dati simulati nel presente studio possono essere considerati attendibili almeno quanto quelli utilizzati in altri studi pubblicati che hanno utilizzato il *software* ENVI-met. Nel seguito, verranno investigati i dati di temperatura dell'aria all'altezza dei pedoni, ovvero a circa 2 m dal suolo. In

particolare, verrà considerata la temperatura media a circa 2 m dal suolo per l'intero dominio investigato e verranno investigati alcuni punti particolari del dominio stesso.
Similmente sono stati confrontati i valori delle velocità del vento registrate sia in ambito urbano, sia in ambito rurale con quelle simulate da ENVI-met (Figura 138-Figura 140) e sono stati calcolati i valori di MAE e RMSE (Tabella 36).

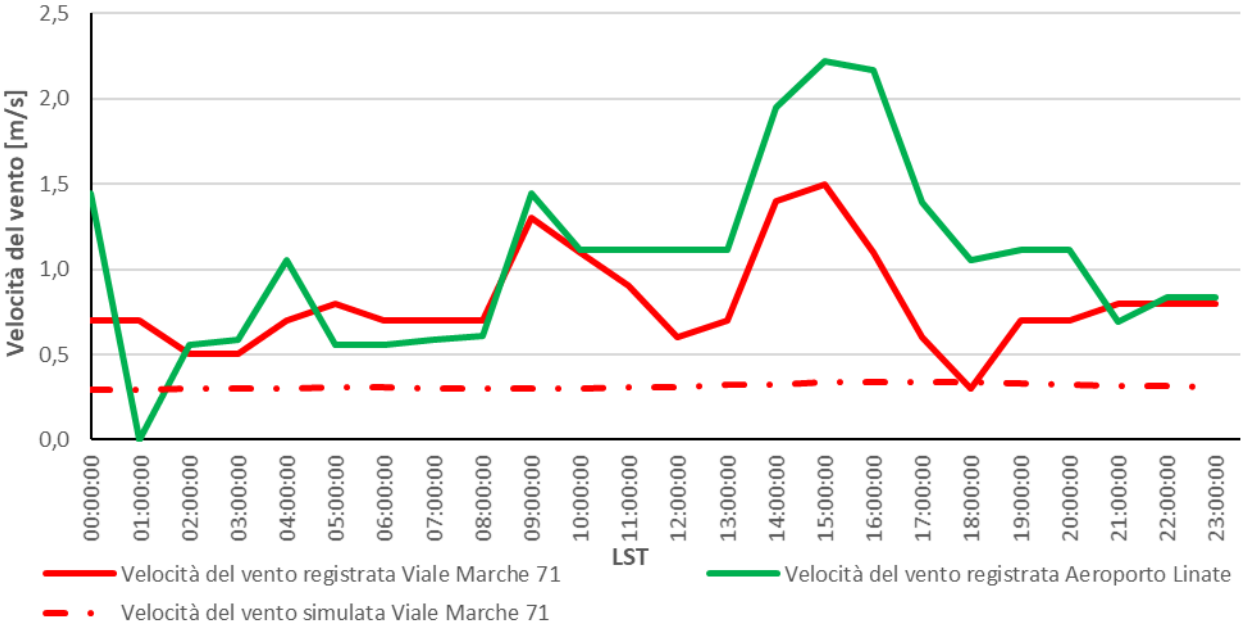


Figura 138. Velocità del vento registrate e simulate in viale Marche 71 relative al giorno tipico invernale (i.e., 14/12/2018)

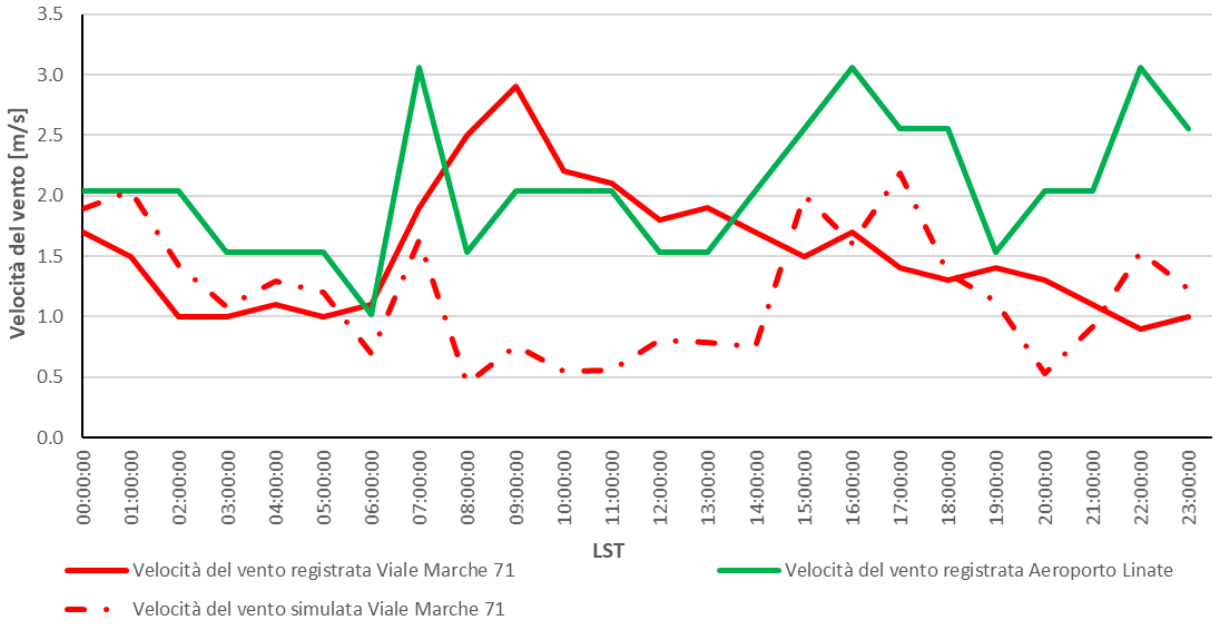


Figura 139. Velocità del vento registrate e simulate in viale Marche 71 relative al giorno tipico estivo (i.e., 19/06/2015)

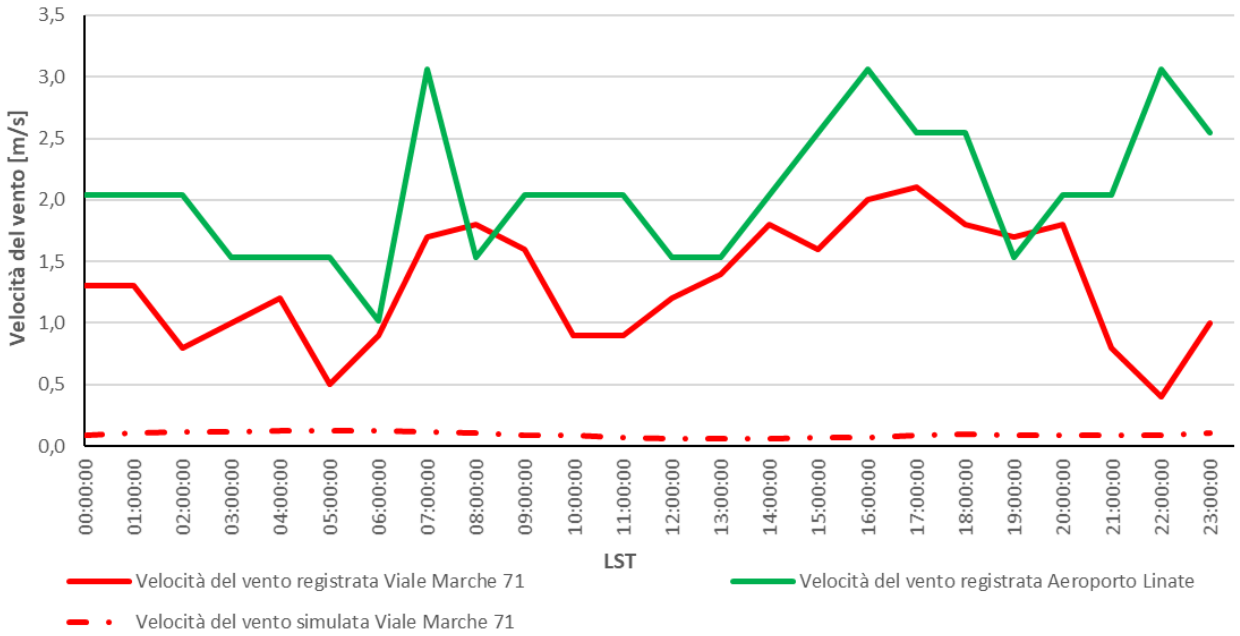


Figura 140. Velocità del vento registrate e simulate in viale Marche 71 relative al giorno tipico con ondata di calore (i.e., 07/07/2015)

Tabella 36. Errori tra velocità del vento registrate e simulate relative a viale Marche 71

	Mean Absolute Error (MAE)	**Root Mean Square Error (RMSE)**
Giornata tipica invernale	0.49 m/s	0.56 m/s
Giornata tipica estiva	0.68 m/s	0.91 m/s
Giornata tipica con ondata di calore	1.22 m/s	1.31 m/s

Le figure da Figura 138 a Figura 140 mostrano come il modello sottostimi la velocità del vento simulata per tutte le giornate di riferimento. Come già espresso nel paragrafo dedicato, per la giornata tipica invernale e per la giornata con onda di calore i dati di vento dell'aeroporto di Linate non sono stati utilizzati come forzanti del modello ENVI-met.

Infine, sono state valutate le variazioni assolute di CO_2 relative alle ore più calde di ciascuna delle giornate tipiche per ciascuno scenario rispetto allo scenario base. Non sono stati considerati altri inquinanti perché il *software* utilizzato li considera in relazioni alla presenza di fonti inquinanti come per esempio automobili. Tuttavia, nelle modellazioni fatte la presenza di traffico veicolare non è stata considerata perché, nello studio presentato, resta fondamentale l'effetto relativo agli scenari di mitigazione basati sull'installazione di pareti e tetti verdi.

7.3.2 Confronto tra temperature dell'aria all'altezza dei pedoni relativi a scenari riferiti alla giornata tipica invernale (14/12/2018)

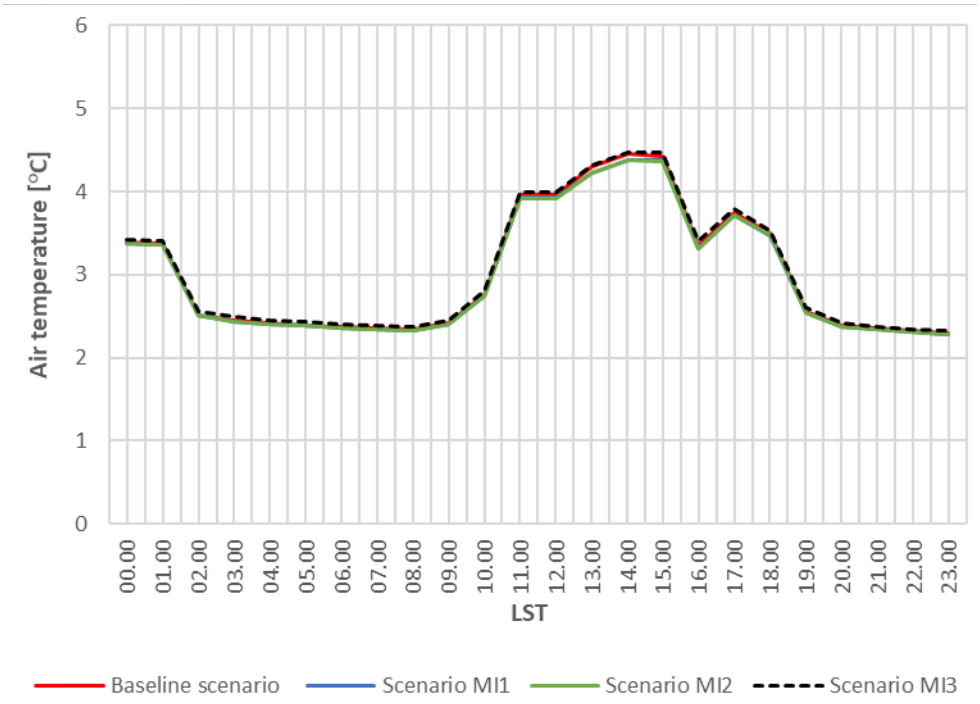


Figura 141. Temperature medie invernali dell'aria (i.e., a 2.1 m dal suolo) calcolate per l'intera area urbana selezionata (i.e., 14/12/2018)

Tabella 37 mostra l'effetto dell'applicazione degli scenari di mitigazione rispetto allo scenario di controllo per tutte le ore del giorno tipico invernale (i.e., 14/12/2018).

Tabella 37. Confronto tra le temperature dello scenario di controllo e gli scenari di mitigazione per il giorno tipico invernale (i.e., 14/12/2018)

Media	$\Delta T_{Baseline-MI1}$	$\Delta T_{Baseline-MI2}$	$\Delta T_{Baseline-MI3}$
00.00	0.01	0.01	-0.03
01.00	0.01	0.01	-0.03
02.00	0.01	0.01	-0.04
03.00	0.01	0.01	-0.04
04.00	0.01	0.01	-0.03
05.00	0.01	0.01	-0.03
06.00	0.01	0.01	-0.03
07.00	0.01	0.01	-0.03
08.00	0.01	0.01	-0.03
09.00	0.01	0.01	-0.03
10.00	0.02	0.02	-0.03
11.00	0.04	0.04	0.00
12.00	0.08	0.08	0.02
13.00	0.09	0.09	0.02
14.00	0.06	0.06	-0.01

15.00	0.05	0.05	-0.02
16.00	0.05	0.04	-0.01
17.00	0.04	0.03	-0.01
18.00	0.03	0.03	-0.02
19.00	0.03	0.03	-0.02
20.00	0.03	0.02	-0.02
21.00	0.02	0.02	-0.01
22.00	0.02	0.02	-0.01
23.00	0.02	0.02	-0.01
Media	**0.03**	**0.03**	**-0.02**

Mentre, per gli scenari MI1 e MI2, che prevedono l'applicazione di sole pareti verdi, è possibile notare una leggera diminuzione della temperatura nelle ore centrali della giornata, durante le ore notturne l'effetto è praticamente trascurabile. Lo scenario MI3 vede invece un aumento, quantitativamente esiguo ma pressoché costante durante tutta la giornata.
La Figura 142 mostra la differenza tra la temperatura dell'aria all'altezza del pedone nel caso dello scenario MI1 e quello *baseline* alle ore 13.00 del 14/12/2018, ovvero nell'ora di maggiore mitigazione dell'isola di calore.

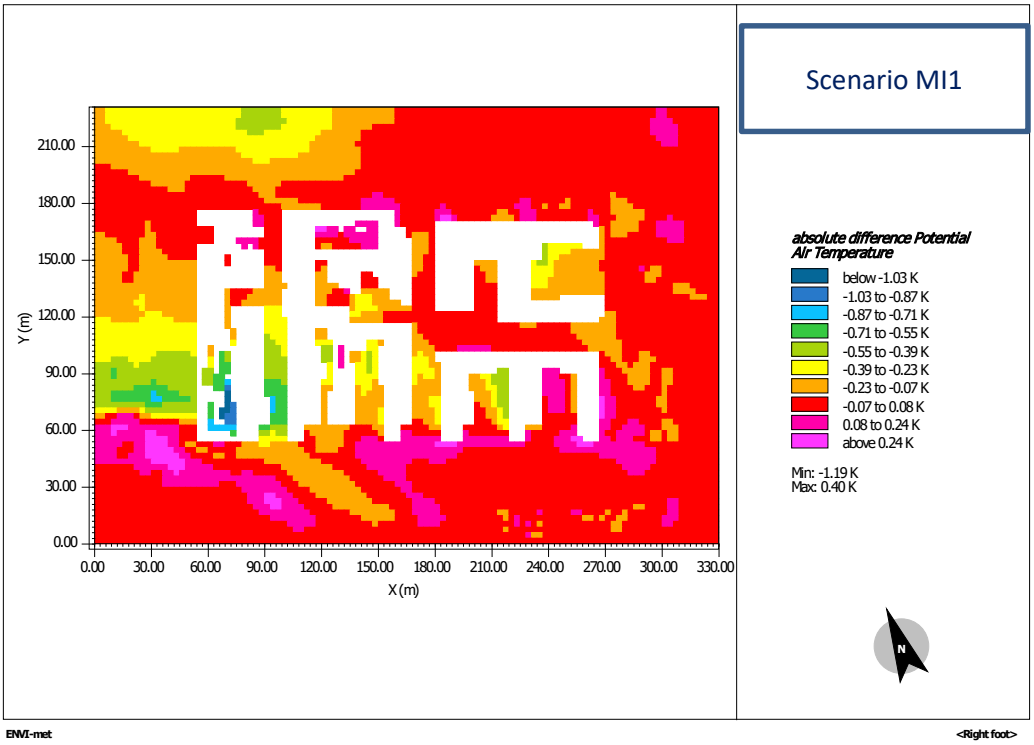


Figura 142. Confronto tra temperature dell'aria all'altezza del pedone (i.e., 2.1 m) tra scenario MI1 e scenario *baseline* ore 13.00 del 14/12/2018

È possibile notare come la differenza di temperatura sia maggiore nella parte ovest dell'area urbana investigata. Tale riduzione di temperatura potrebbe essere dovuta al vento che muove l'aria che si è raffreddata per la presenza del verde nella parte centrale dell'area. Si può inoltre notare che la riduzione di temperatura ambiente sia inferiore al grado. La massima differenza di temperatura si osserva in un contesto chiuso (cortile). Da questo si può dedurre come l'efficacia dell'installazione dei tetti verdi estensivi dipende fortemente da elementi di contesto.

Gli scenari MI2 e MI3 (in Figura 143 e Figura 144) generano risultati praticamente identici, con cambiamenti minimi nella distribuzione delle temperature ma mantenendo valori assoluti della variazione di temperatura senza cambiamenti osservabili.

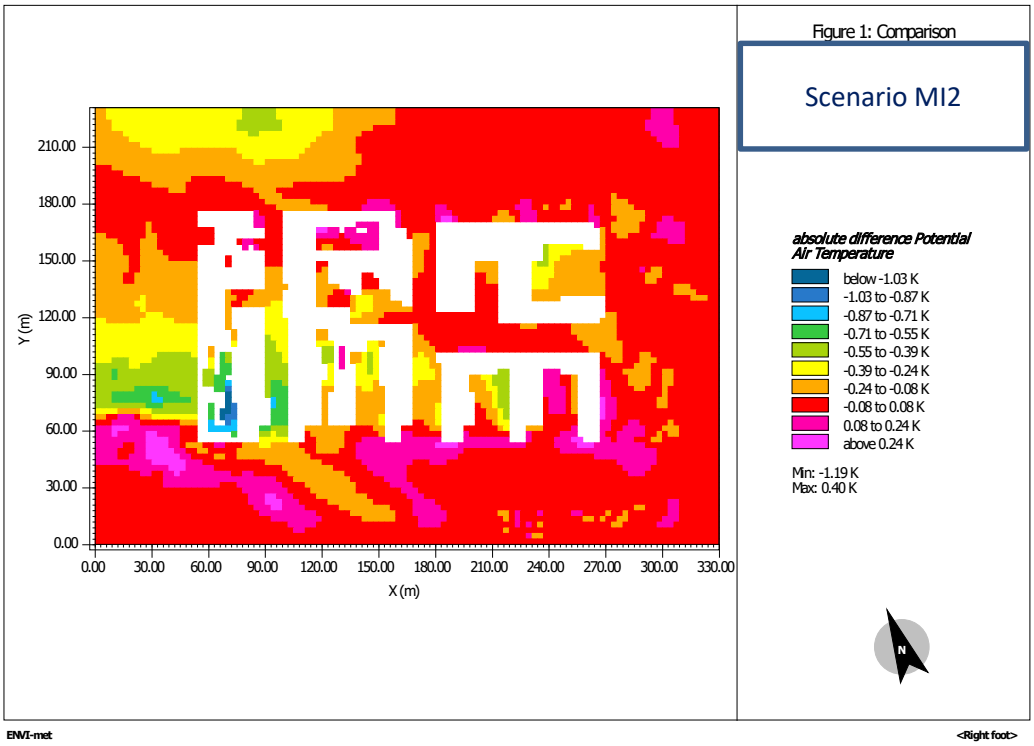


Figura 143. Confronto tra temperature dell'aria all'altezza del pedone (i.e., 2.1 m) tra scenario MI2 e scenario *baseline* ore 13.00 del 14/12/2018

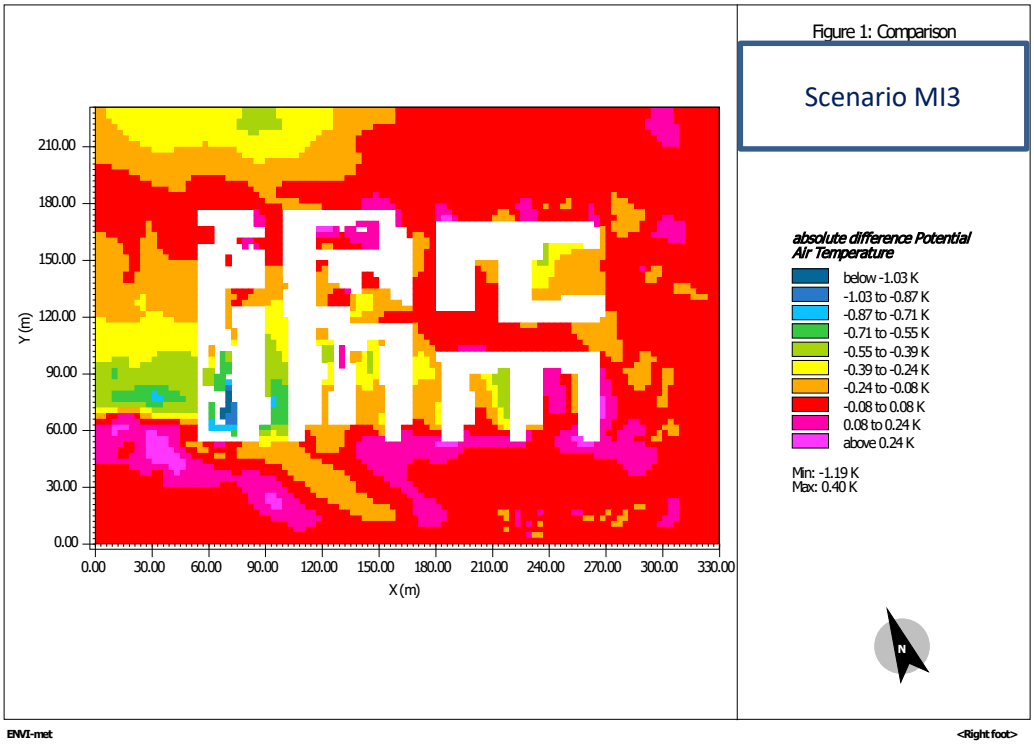


Figura 144. Confronto tra temperature dell'aria all'altezza del pedone (i.e., 2.1 m) tra scenario MI3 e scenario *baseline* ore 13.00 del 14/12/2018

In sintesi, l'applicazione dei tre scenari di mitigazione ha mostrato che:
- nella giornata tipica invernale, l'installazione di pareti verdi in *canyon* urbani (MI1 e MI2), eventualmente accompagnati da un tetto verde (MI3) ha effetti poco significativi sulla mitigazione dell'isola di calore urbana;
- ai fini della valutazione degli effetti sulla mitigazione dell'isola di calore urbana appaiono più significativi elementi di contesto (i.e., la presenza di spazi chiusi come cortili e la distribuzione del vento) rispetto alla realizzazione di pareti e teti verdi;
- gli effetti nell'arco della giornata sono molto simili per scenari che prevedano tetti verdi in *canyon* urbani (i.e., MI1 e MI2), mentre l'accoppiamento di pareti verdi in *canyon* e tetto verde (i.e., MI3) mostra una influenza in termini di aumento della temperatura dell'aria ambiente.

È stata valutata la variazione di CO_2 degli scenari di mitigazione relativi al 14/12/2018 alle ore 13.00, ovvero all'ora in cui la temperatura è massima poiché la combinazione tra inquinanti e temperatura può determinare i maggiori effetti sulla salute umana, rispetto allo scenario base.
La Figura 145 mostra la concentrazione del biossido di carbonio ad altezza pedonale relativo alle ore 13.00 e allo scenario base.

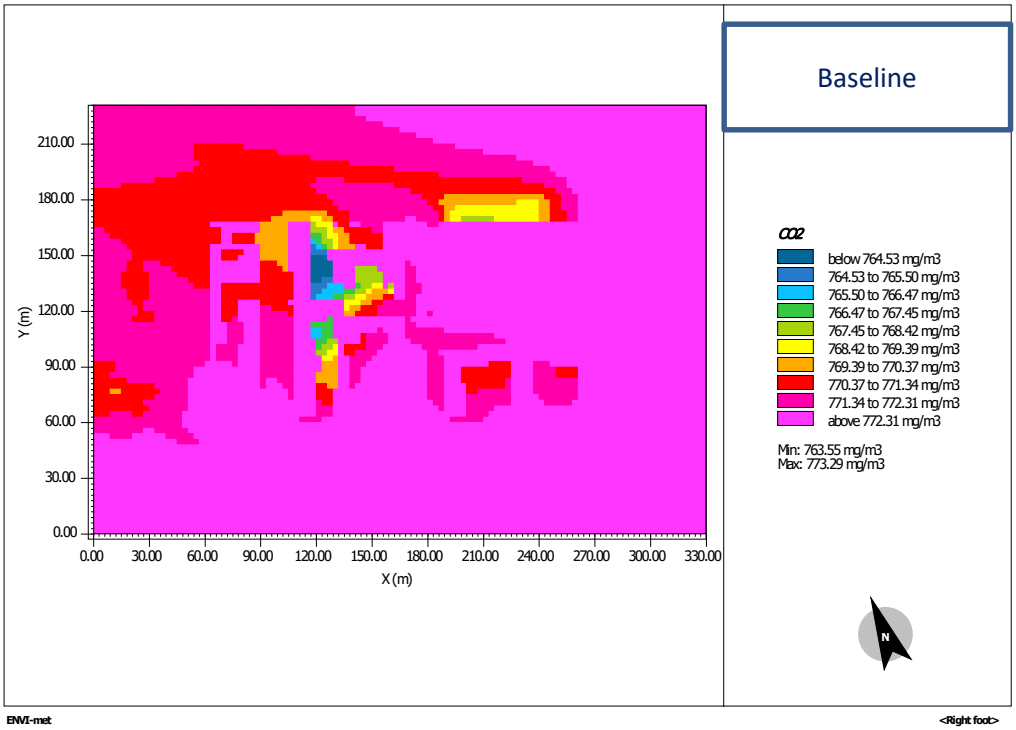


Figura 145. Concentrazione di CO_2 (mg/m^3) dell'aria all'altezza del pedone (i.e., 2.1 m) scenario *baseline* ore 13.00 del 14/12/2018

La concentrazione di CO_2 nell'intera area varia tra circa 764 e 773 mg/m^3.
L'applicazione dello scenario di mitigazione MI1 dà origine ad una variazione della concentrazione di biossido di carbonio compresa tra -1.94 e +9.36 mg/m^3 (Figura 146). Tale variazione si attesta tra 1.45 e 3.71 lungo la via su cui insiste la parete verde relativa allo scenario MI1 (pari a circa lo 0.3% di variazione).

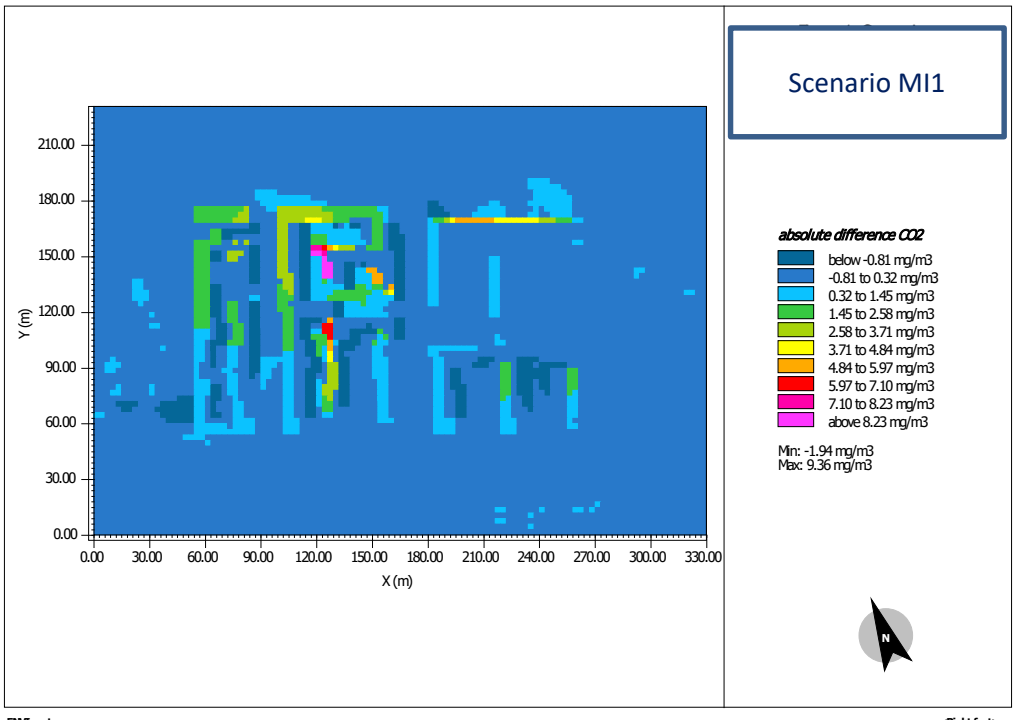


Figura 146. Confronto tra concentrazione di CO_2 (mg/m^3) dell'aria all'altezza del pedone (i.e., 2.1 m) tra scenario *baseline* e scenario MI1 ore 13.00 del 14/12/2018

Similmente è stata confrontata anche la concentrazione della CO_2 relativa agli scenari MI2 e MI3 (Figura 147 e Figura 148), che, come nel precedente confronto di temperature, mostrano risultati praticamente identici e simili agli effetti simulati con lo scenario precedente. Anche in questo caso, infatti, si possono trovare differenze degli effetti ambientali decisamente ridotte e localizzate in pochi punti dell'area di riferimento.

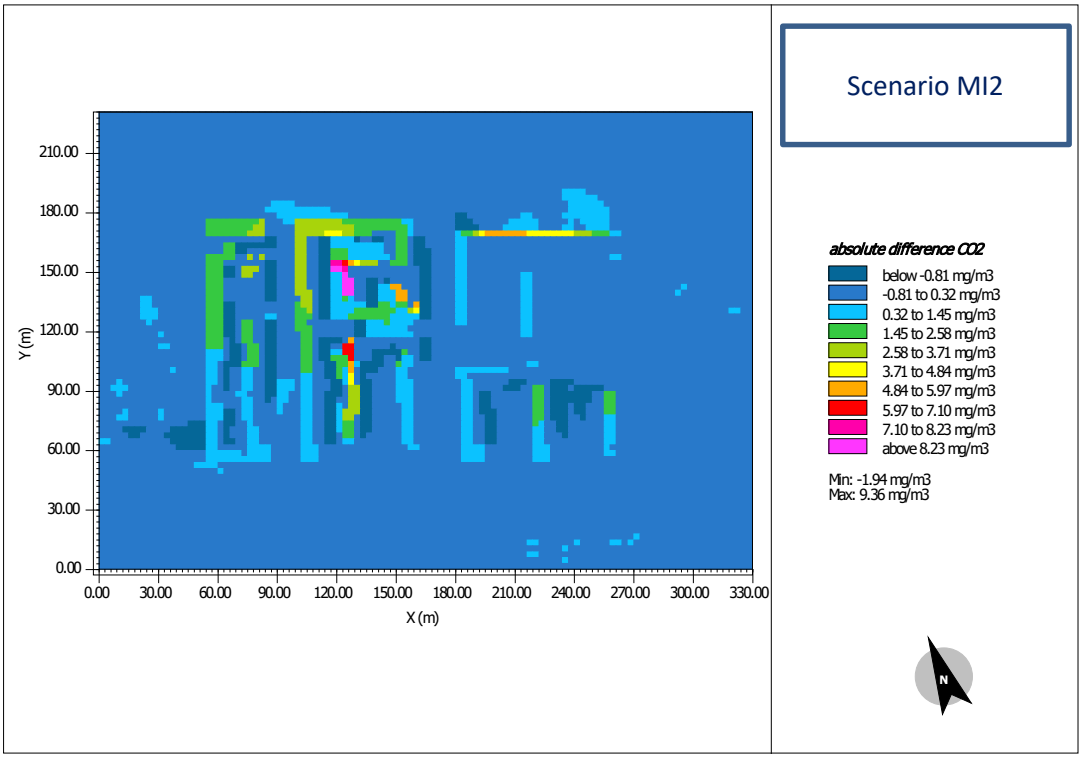


Figura 147. Confronto tra concentrazione di CO_2 (mg/m^3) dell'aria all'altezza del pedone (i.e., 2.1 m) tra scenario

***baseline* e scenario MI2 ore 13.00 del 14/12/2018**

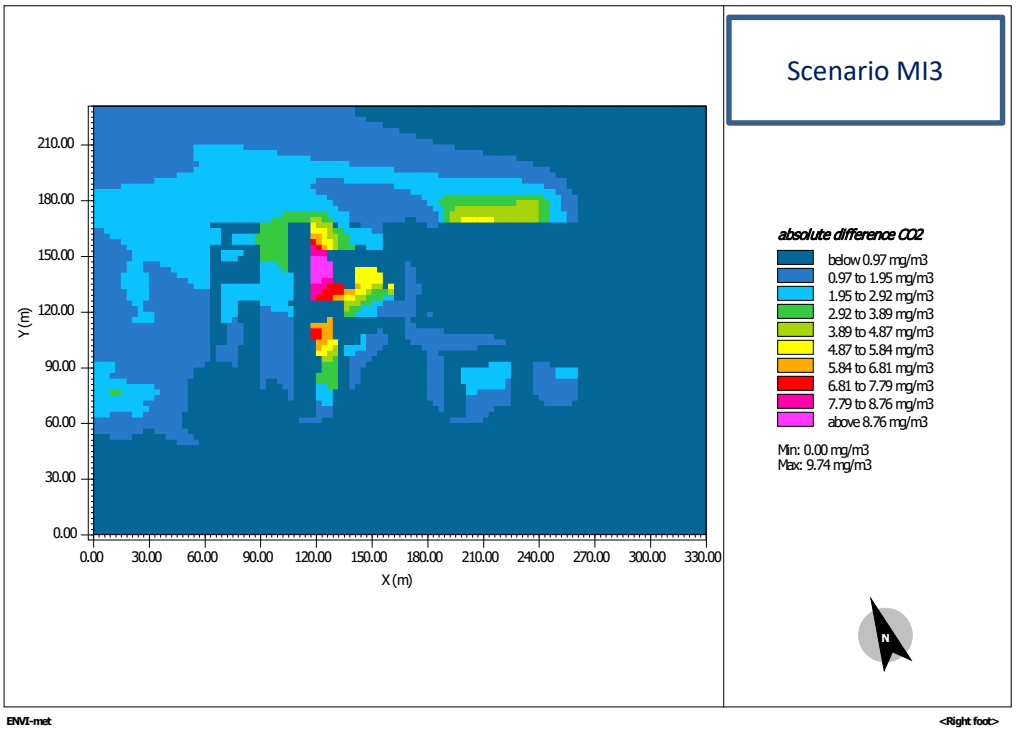


Figura 148. Confronto tra concentrazione di CO_2 (mg/m^3) dell'aria all'altezza del pedone (i.e., 2.1 m) tra scenario *baseline* e scenario MI3 ore 13.00 del 14/12/2018

Si osserva che i tre scenari hanno effetti esigui e praticamente identici ai fini della variazione della concentrazione di CO_2. Effetti significativi di variazione rispetto allo scenario base sono presenti nelle mappe precedenti, ma l'effetto non pare influenzato dall'installazione di verde quanto piuttosto dagli effetti del vento o della presenza di aree chiuse (come cortili).

7.3.3 Confronto tra le temperature dell'aria all'altezza dei pedoni relativi a scenari riferiti alla giornata tipica estiva (19/06/2015)

Le temperature puntuali dell'aria relative per ogni cella del modello e ad un'altezza di 2.1 m dal suolo sono state calcolate in ENVI-met e utilizzate per calcolare la media dell'intera area urbana oggetto di studio per le diverse ore del tipico giorno estivo (19/6/2015). La Figura 149 mostra come le temperature relative agli scenari di mitigazione ricalchino fedelmente l'andamento delle temperature dello scenario di controllo (i.e., scenario *baseline*).

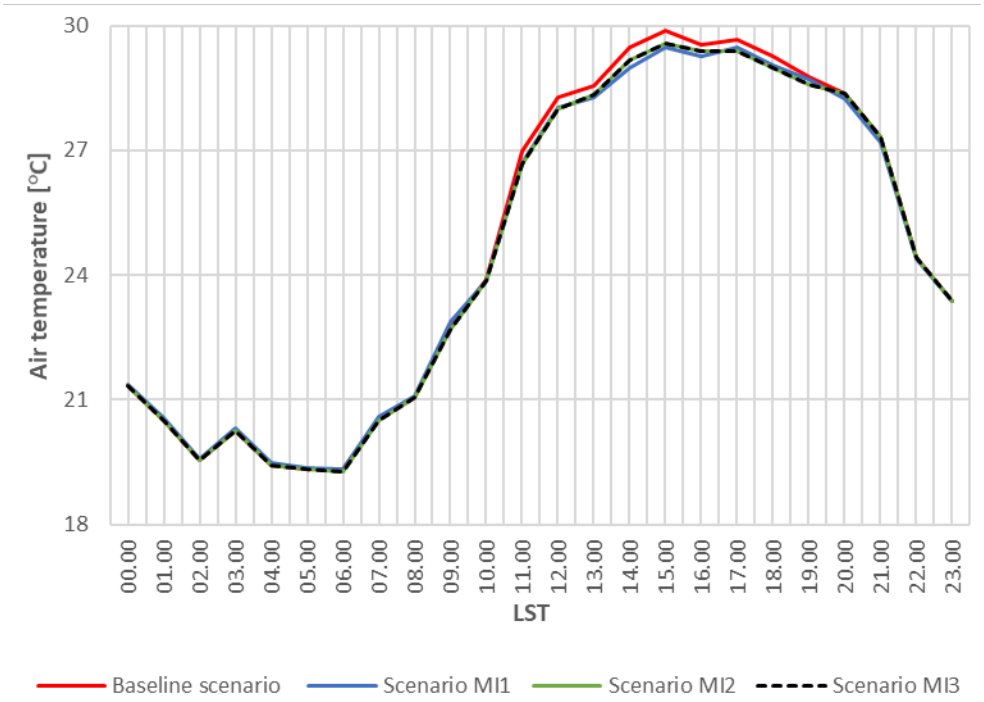


Figura 149. Temperature medie estive dell'aria (i.e., a 2.1 m dal suolo) calcolate per l'intera area urbana selezionata per il giorno tipico estivo (i.e., 19/06/2015)

La Tabella 38 mostra gli effetti della mitigazione dell'isola di calore urbana a seguito dell'applicazione dei tre scenari di mitigazione.

Tabella 38. Confronto tra le temperature dello scenario di controllo e gli scenari di mitigazione per il giorno tipico estivo (i.e., 19/06/2015)

Ora	$\Delta T_{Baseline-MI1}$	$\Delta T_{Baseline-MI2}$	$\Delta T_{Baseline-mi3}$
00.00	-0.04	-0.01	-0.01
01.00	-0.04	0.01	0.01
02.00	-0.03	0.01	0.01
03.00	-0.05	0.00	0.00
04.00	-0.05	0.00	0.00
05.00	-0.05	-0.01	-0.01
06.00	-0.01	0.06	0.06
07.00	-0.05	0.04	0.05
08.00	-0.02	-0.01	-0.01
09.00	-0.13	0.07	0.07
10.00	0.03	0.02	0.03

11.00	0.27	0.30	0.31
12.00	0.25	0.28	0.28
13.00	0.28	0.23	0.22
14.00	0.47	0.29	0.29
15.00	0.41	0.29	0.29
16.00	0.29	0.16	0.16
17.00	0.20	0.28	0.28
18.00	0.21	0.26	0.26
19.00	0.09	0.21	0.21
20.00	0.11	-0.01	-0.01
21.00	0.11	0.00	0.00
22.00	0.03	-0.01	-0.01
23.00	0.00	0.00	0.00
Media	**0.09**	**0.10**	**0.10**

Come è possibile notare, i tre scenari hanno andamenti ed effetti molto simili, con un effetto di diminuzione della temperatura media dell'aria durante le ore diurne, pari a circa 0.1°C, con punte superiori a 0.4°C riscontrabili a partire dal pomeriggio.

Di seguito sono stati investigati i comportamenti dei tre scenari di mitigazione dell'isola di calore urbana durante l'ora in cui maggiormente riducono la temperatura dell'aria a livello pedonale (i.e., ore 14.00) durante la giornata tipica estiva (i.e., 19/06/2015).

La Figura 150 mostra la mitigazione relativa all'applicazione dello scenario MI1 rispetto allo scenario di riferimento (i.e., *baseline*). È possibile osservare che l'installazione di pareti verdi nel *canyon* urbano riesce a ridurre la temperatura dell'aria in maniera sensibile, pari a circa 0.5°C lungo tutto la strada interessata dall'installazione verde. Una maggiore riduzione è osservata in corrispondenza di configurazioni urbane chiuse o a corte, dove la mitigazione può raggiungere anche 1°C.

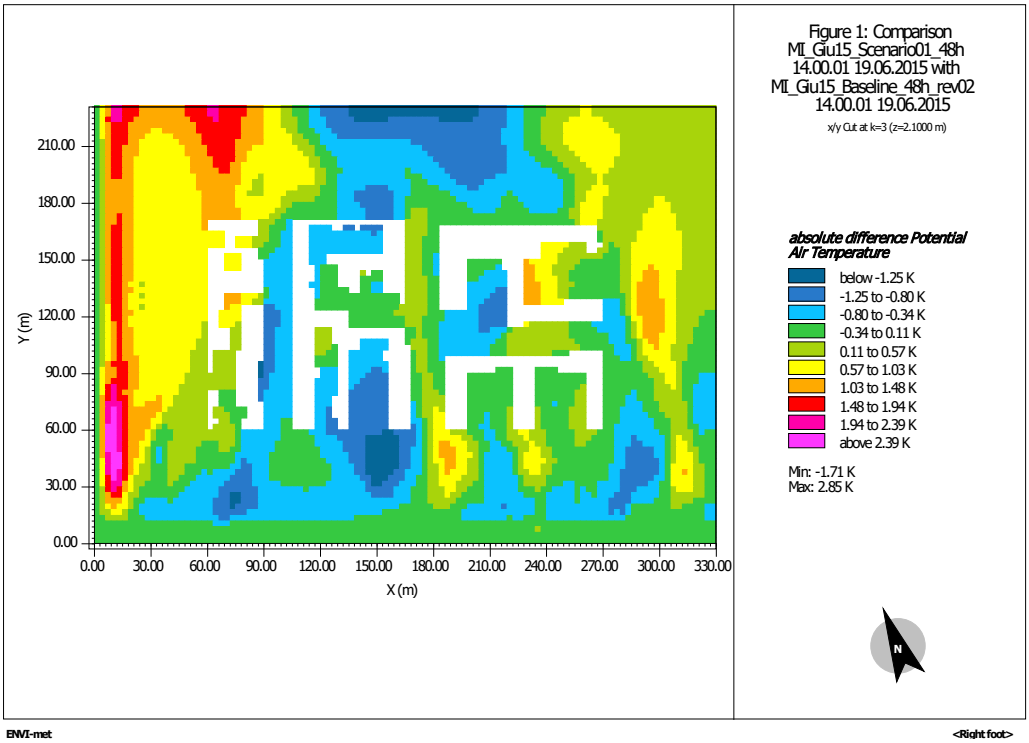


Figura 150. Confronto tra temperature dell'aria all'altezza del pedone (i.e., 2.1 m) tra scenario MI1 e scenario *baseline* ore 14.00 del 19/06/2015

La Figura 151 mostra l'effetto dell'applicazione dello scenario MI2, che vede la realizzazione di una parete verde su tutti gli edifici della via Paolo Bassi (la direttrice nord-sud, al centro nella figura). Si può notare come la strada interessata dall'installazione verde ottiene una riduzione della temperatura dell'aria all'altezza dei pedoni molto variabile, fino a circa 0.8°C, anche se la magnitudo dell'effetto è decisamente inferiore allo scenario MI1 a causa del minor "effetto *canyon*" legato alla maggiore larghezza della strada e alla maggior presenza di intersezioni. Anche in questo caso si osservano alcune aree, come per esempio le corti verdi tra gli edifici, in cui è esaltato l'effetto di mitigazione.

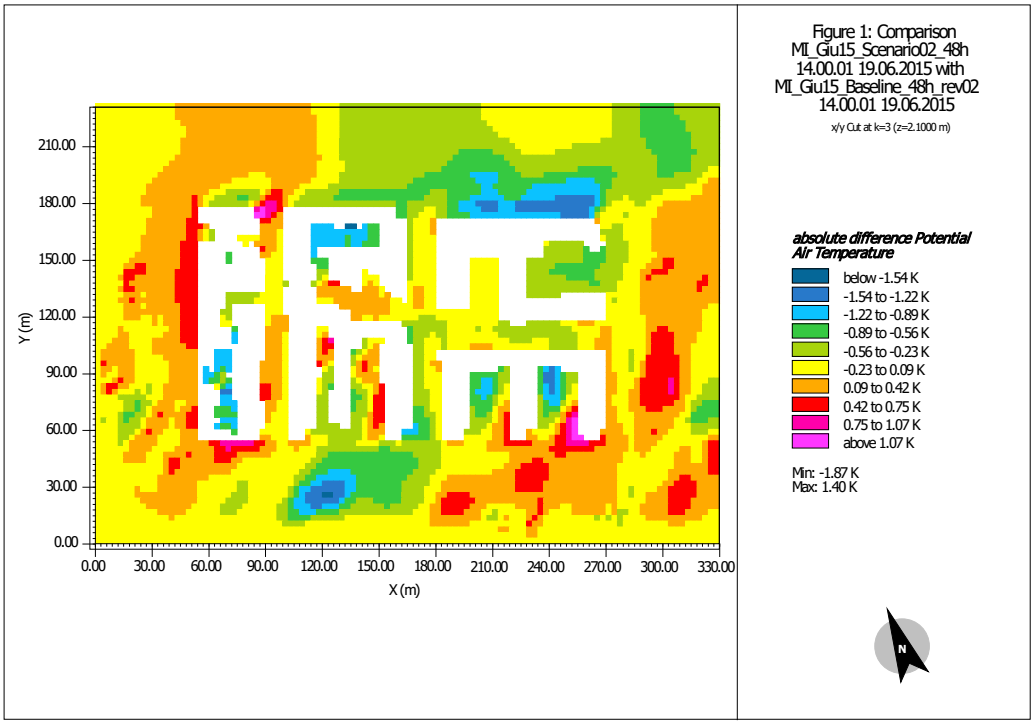


Figura 151. Confronto tra temperature dell'aria all'altezza del pedone (i.e., 2.1 m) tra scenario MI2 e scenario *baseline* ore 14.00 del 19/06/2015

La Figura 152 mostra l'effetto dell'applicazione dello scenario MI3, che allo scenario precedente aggiunge un tetto verde in testa alla via (a nord). Si osserva come le riduzioni di temperatura rispetto al precedente MI2 siano decisamente limitati, variando il picco di riduzione ma mantenendo pressoché identica la variazione di temperatura nell'intera area analizzata (fatto salvo per piccole variazioni spot).

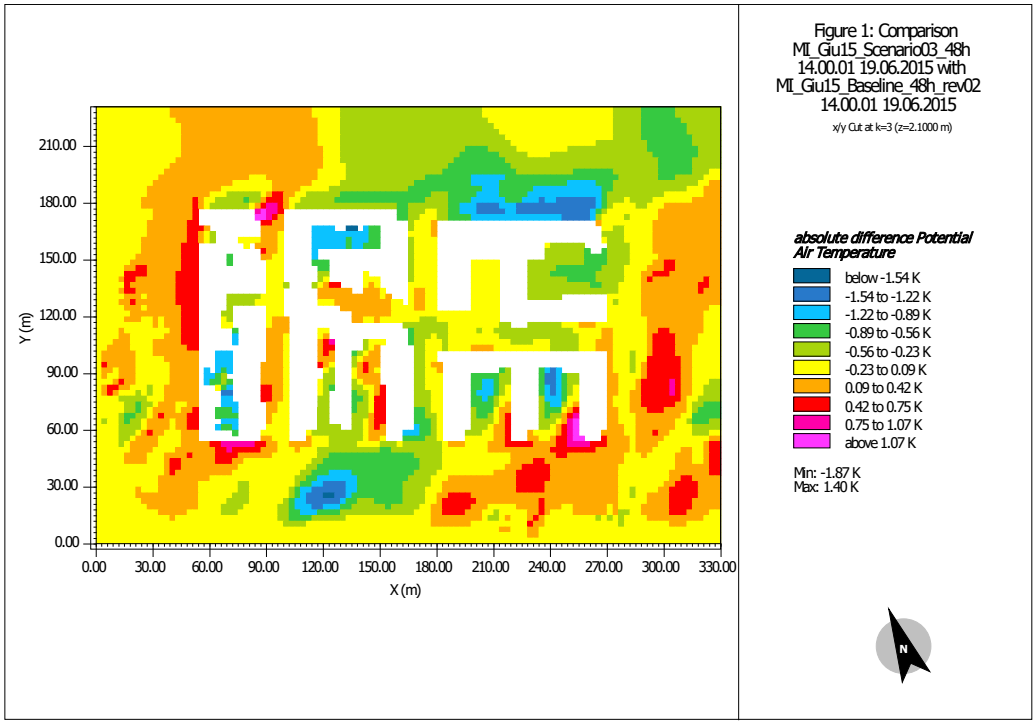


Figura 152. Confronto tra temperature dell'aria all'altezza del pedone (i.e., 2.1 m) tra scenario MI3 e scenario *baseline* ore 14.00 del 19/06/2015

In sintesi, l'applicazione dei tre scenari di mitigazione ha mostrato che:
- l'applicazione di pareti verdi su un edificio in *canyon* urbani ha un effetto riduttivo della temperatura dell'aria potenzialmente sensibile, dell'ordine di qualche decimo di grado (fino a 1°C circa). L'effetto è più significativo per applicazioni in *canyon* stretti (i.e., scenario MI1, su una strada di larghezza di circa 14 m e con edifici continui su entrambe i lati) piuttosto che su strade più ampie e con soluzione di continuità degli edifici che insistono sulla via (i.e. MI2 e MI3);
- l'aggiunta di un tetto verde insistente su una strada già dotata di pareti verdi non influenza l'impatto sulla temperatura dell'ambiente circostante;
- l'installazione di pareti verdi è in grado di migliorare le prestazioni di riduzione della temperatura dell'aria di verde (spot) esistente, in particolare in contesti chiusi come cortili.

Come per la giornata tipica invernale, la variazione di concentrazione di biossido di carbonio è stata considerata nell'ora più calda di tutta la giornata, ovvero alle ore 17.00. La Figura 153 mostra che durante la giornata tipica estiva la concentrazione massima di CO_2 è pari a circa 725 mg/m^3, uniforme nella maggior parte dell'area urbana considerata.

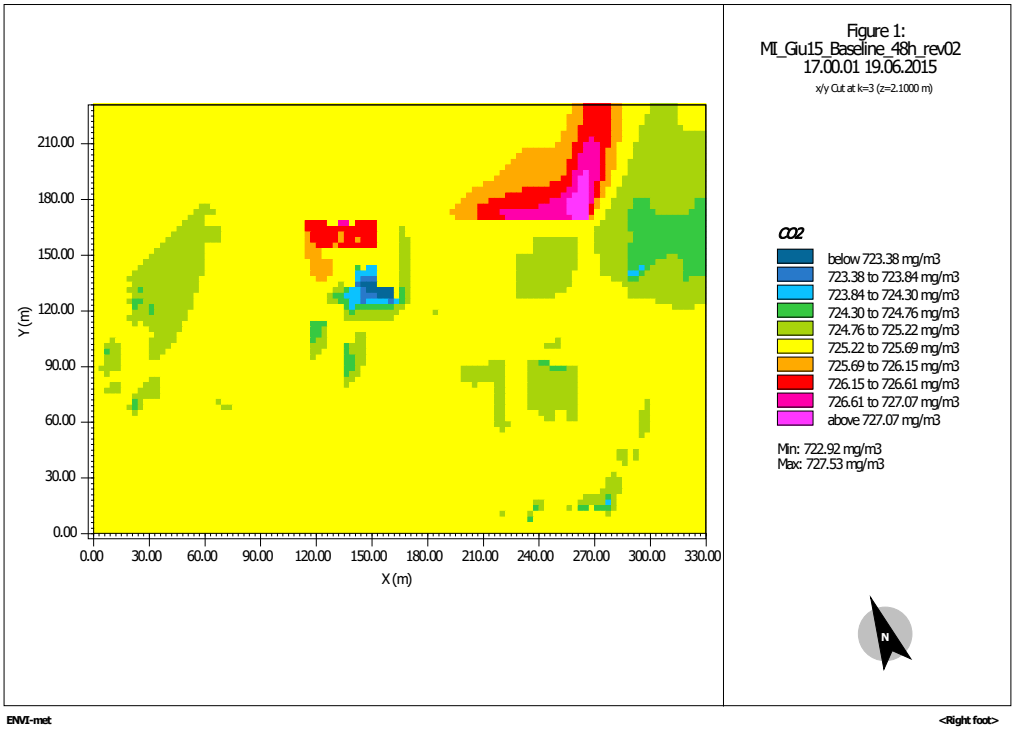


Figura 153. Concentrazione di CO_2 (mg/m^3) dell'aria all'altezza del pedone (i.e., 2.1 m) scenario *baseline* ore 17.00 del 19/06/2015

La Figura 154 mostra, anche in questo caso, come la variazione di biossido di carbonio è esigua. In particolare, la variazione osservata sulla concentrazione di CO_2 varia in un range tra -0.85 e +0.41 mg/m^3 nella maggior parte dell'area. Fanno eccezione solo la parte N/NE dell'area in cui risulta evidente l'effetto del vento e l'effetto di concentrazione in uno spazio chiuso (cortile) nella parte centrale dell'area.

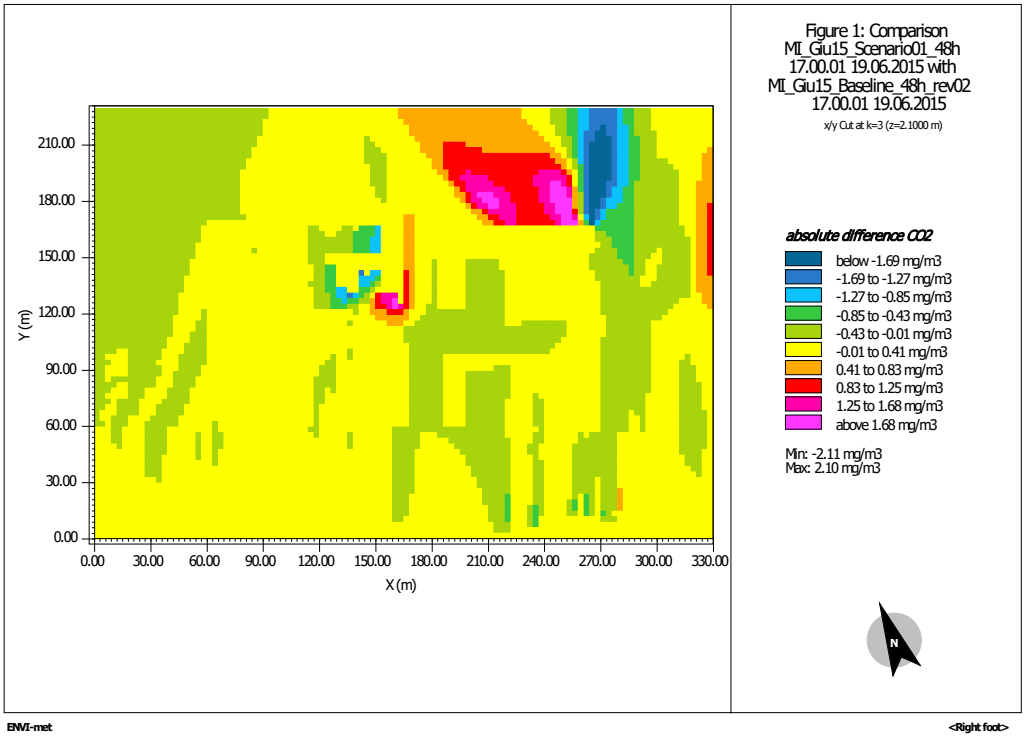


Figura 154. Confronto tra concentrazione di CO_2 (mg/m^3) dell'aria all'altezza del pedone (i.e., 2.1 m) tra scenario *baseline* e scenario MI1 ore 17.00 del 19/06/2015

Similmente, anche la Figura 155 e la Figura 156, a seguito dell'applicazione degli scenari di mitigazione MI2 e MI3, mostrano qualitativamente gli stessi effetti già considerati in precedenza, rispetto agi effetti del vento e della presenza di spazi chiusi (cortili). In compenso variano sensibilmente i valori assoluti di variazioni di CO_2 con valori compresi, per la maggior parte dell'area, tra -3.87 e +0.42 mg/m^3.

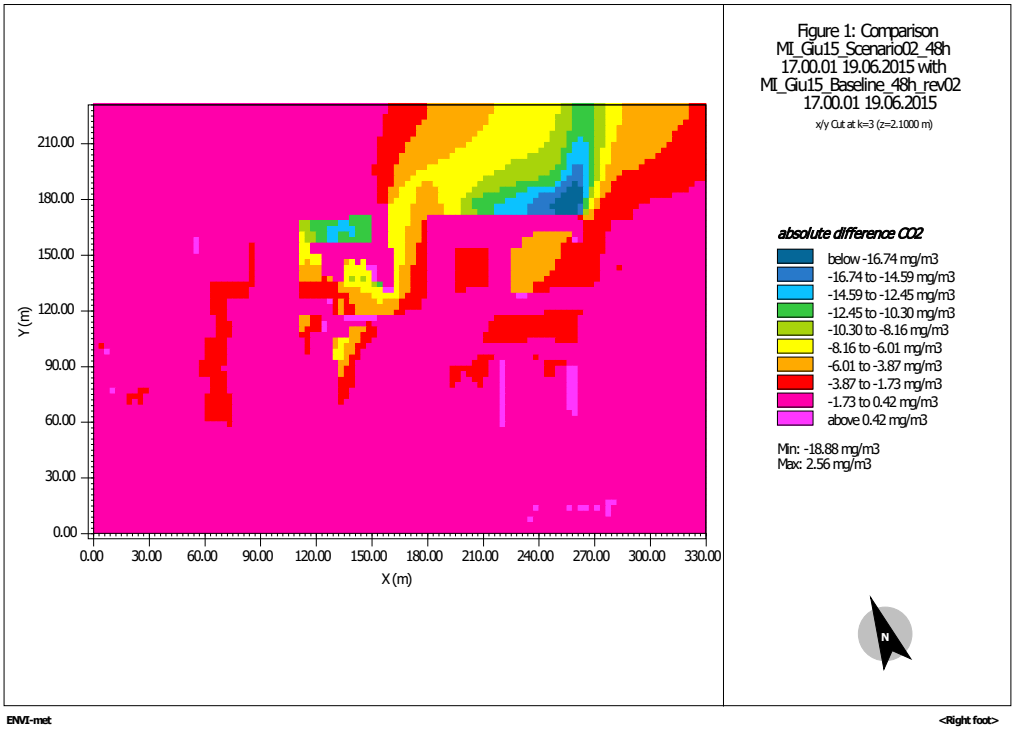


Figura 155. Confronto tra concentrazione di CO_2 (mg/m^3) dell'aria all'altezza del pedone (i.e., 2.1 m) tra scenario *baseline* e scenario MI2 ore 17.00 del 19/06/2015

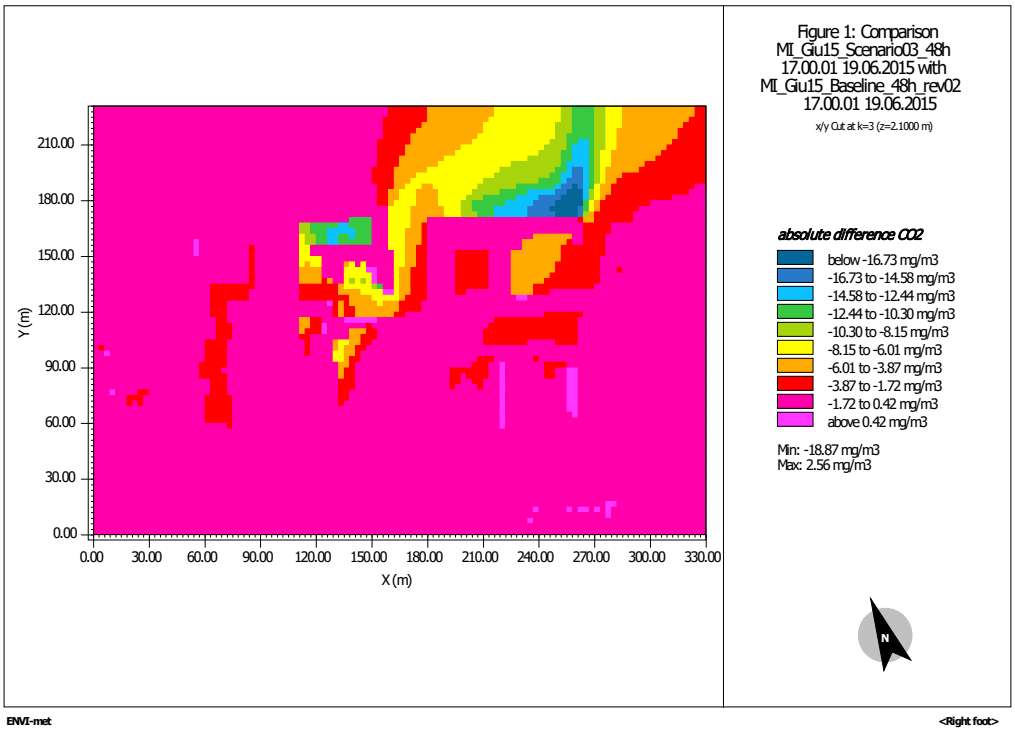


Figura 156. Confronto tra concentrazione di CO_2 (mg/m^3) dell'aria all'altezza del pedone (i.e., 2.1 m) tra scenario *baseline* e scenario MI3 ore 17.00 del 19/06/2015

7.3.4 Confronto tra le temperature dell'aria all'altezza dei pedoni relativi a scenari riferiti alla giornata tipica con ondata di calore (07/07/2015)

In Figura 157 è stato anche indagato l'effetto dell'applicazione degli scenari di mitigazione sulle temperature giornaliere di una giornata tipica di un'ondata di calore (i.e., 07/07/2015).

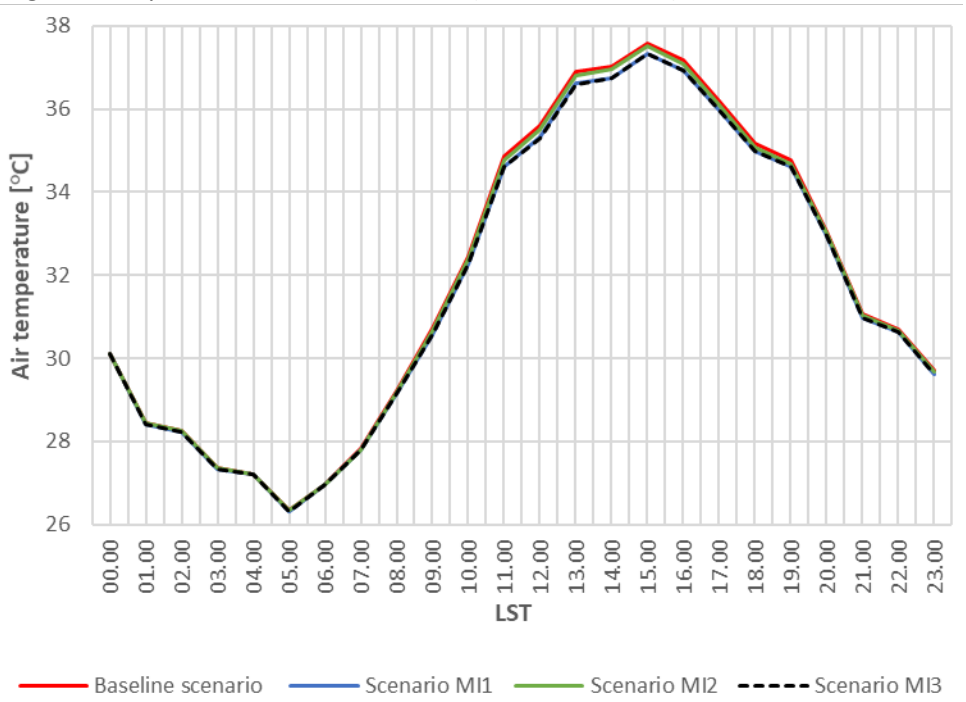


Figura 157. Temperature medie relative ad un'ondata di calore (i.e., a 2.1 m dal suolo) calcolate per l'intera area urbana selezionata per il giorno tipico con ondata di calore (i.e., 07/07/2015)

È possibile notare che, anche in questo caso, le temperature degli scenari di mitigazione ricalcano bene l'andamento delle temperature dello scenario *baseline*. Infatti, la Tabella 39 mostra che la mitigazione media relativa allo scenario MI1 è pari a 0.12 °C, quella relativa allo scenario MI2 è pari a 0.04 °C e quella relativa allo scenario MI3 è pari a 0.13.

Tabella 39. Confronto tra le temperature dello scenario di controllo e gli scenari di mitigazione per il giorno tipico con ondata di calore (i.e., 07/07/2015)

Ora	$\Delta T_{Baseline-MI1}$	$\Delta T_{Baseline-MI2}$	$\Delta T_{Baseline-MI3}$
00.00	0.02	0.01	0.02
01.00	0.03	0.01	0.03
02.00	0.02	0.00	0.02
03.00	0.02	0.00	0.02
04.00	0.01	0.00	0.01
05.00	0.02	0.00	0.02
06.00	0.01	0.00	0.00
07.00	0.02	0.01	0.03
08.00	0.06	0.03	0.07
09.00	0.13	0.05	0.13
10.00	0.19	0.07	0.20
11.00	0.24	0.09	0.26

12.00	0.28	0.09	0.29
13.00	0.28	0.07	0.30
14.00	0.28	0.06	0.29
15.00	0.26	0.07	0.27
16.00	0.23	0.08	0.24
17.00	0.22	0.10	0.22
18.00	0.19	0.09	0.18
19.00	0.13	0.07	0.13
20.00	0.10	0.04	0.09
21.00	0.09	0.03	0.09
22.00	0.07	0.02	0.07
23.00	0.07	0.02	0.07
Media	**0.12**	**0.04**	**0.13**

Nel dettaglio, gli scenari di mitigazione MI1 e MI3 mostrano i valori massimi di mitigazione nelle ore centrali della giornata, dalle ore 10.00 alle ore 17.00 circa, quando la temperatura diminuisce di più di 0.2 °C (con punte fino a 0.3 °C di riduzione); l'applicazione dello scenario MI2 mostra una mitigazione più contenuta dell'isola di calore urbana che nelle ore centrali raggiunge un massimo di 0.1 °C.

Per quel che riguarda la giornata tipica con ondata di calore, di seguito, si è scelto di analizzare più nel dettaglio l'ora in cui gli scenari esercitano il maggiore effetto, ovvero le ore 13.00.

La Figura 158 mostra come l'effetto dovuto all'applicazione dello scenario MI1 dipenda fortemente dal vento. In particolare, il vento da sud convoglia l'aria raffreddata per la presenza della vegetazione, verso nord, determinando una riduzione della temperatura ad altezza pedonale. Tuttavia, la magnitudo di tale mitigazione resta esigua, ovvero dell'ordine di 0.15 °C nella maggior parte dell'area.

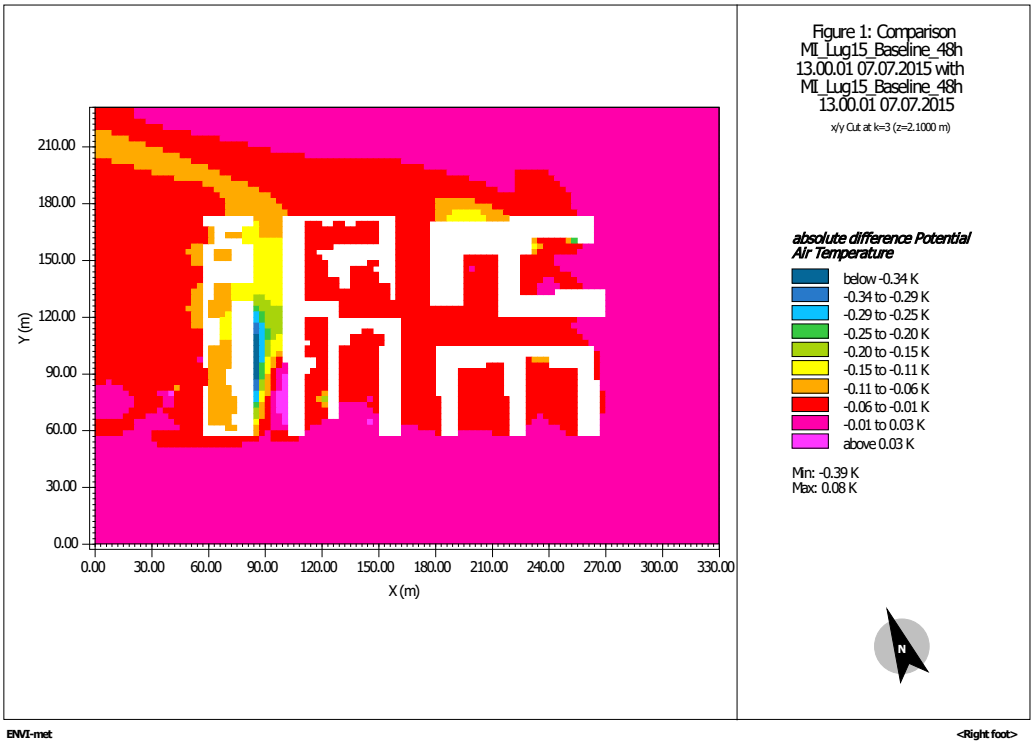


Figura 158. Confronto tra temperature dell'aria all'altezza del pedone (i.e., 2.1 m) tra scenario MI1 e scenario *baseline* ore 13.00 del 07/07/2015

L'applicazione dello scenario MI2 mostra, in Figura 159, una variazione molto contenuta nella maggior parte dell'area con punte di mitigazione di ~0.7 °C. Anche in questo caso, si osservano sacche di aria più fredda intrappolate nei cortili che, grazie alla loro conformazione, trattengono l'aria più fresca (raffrescata, oltre che dalle pareti verdi di nuova installazione, anche da verde urbano preesistente) che quindi non viene dispersa dal vento.

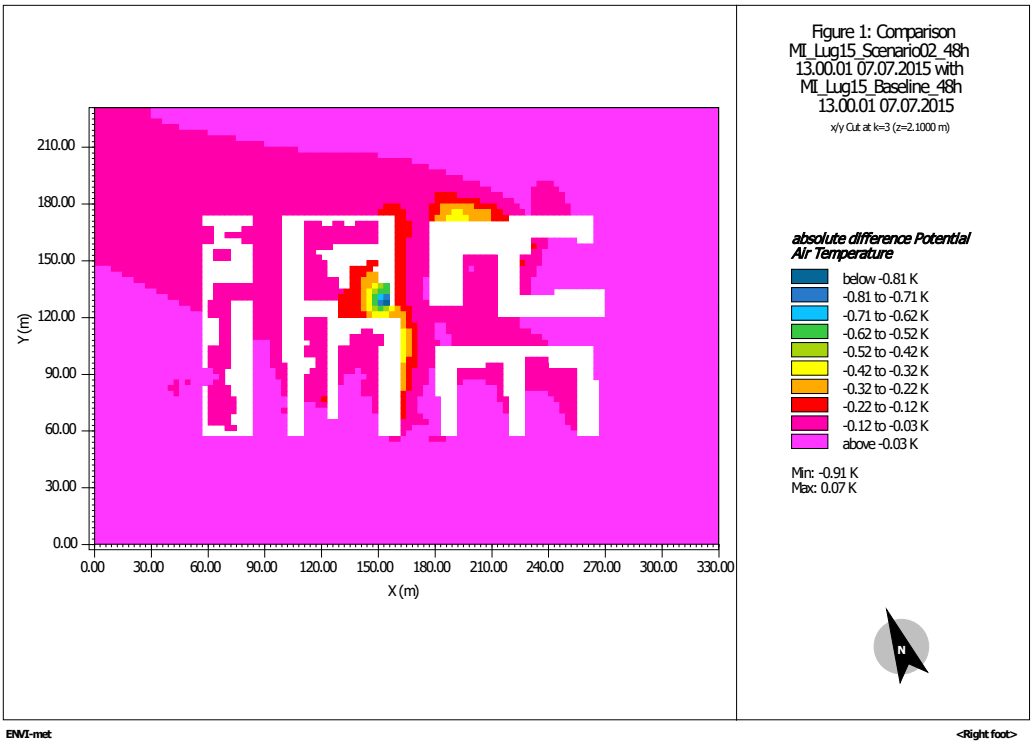


Figura 159. Confronto tra temperature dell'aria all'altezza del pedone (i.e., 2.1 m) tra scenario MI2 e scenario *baseline* ore 13.00 del 07/07/2015

Infine, la Figura 160 mostra l'effetto dell'applicazione dello scenario MI3. Rispetto al caso precedente, si può notare che l'applicazione di un tetto verde su un singolo edificio produce una mitigazione aggiuntiva circoscritta e di entità contenuta, coerentemente con lo scenario.

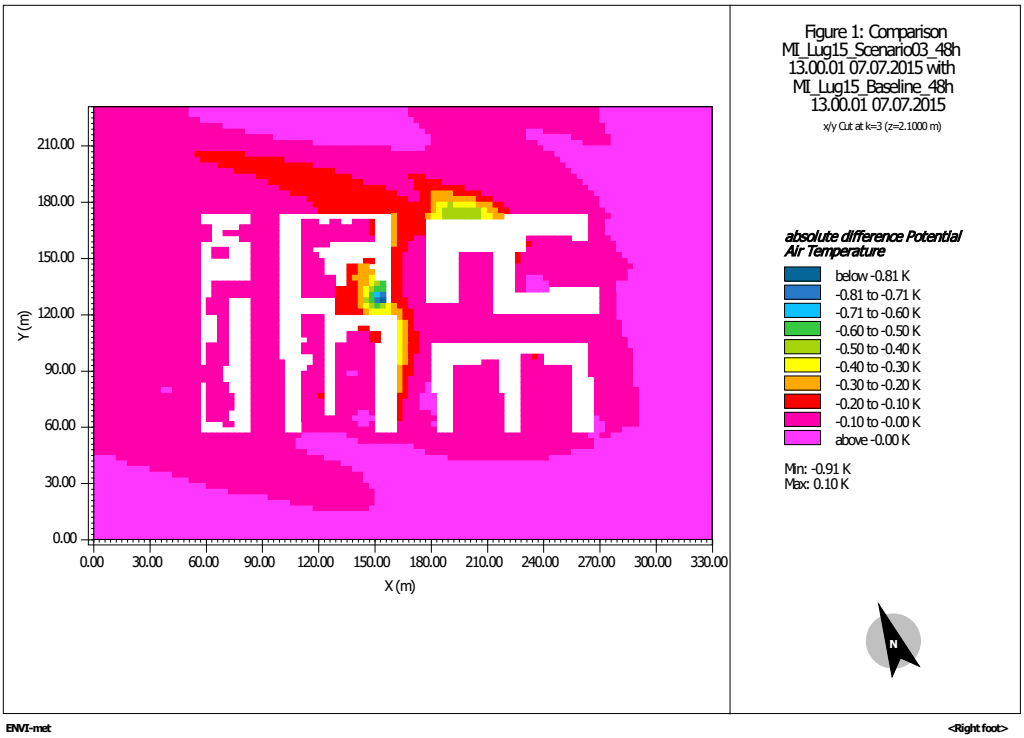


Figura 160. Confronto tra temperature dell'aria all'altezza del pedone (i.e., 2.1 m) tra scenario MI3 e scenario *baseline* ore 13.00 del 07/07/2015

In sintesi, l'applicazione dei tre scenari di mitigazione ha mostrato che:
- l'effetto dell'installazione di pareti verdi (*living wall)* (i.e., *canyon* urbani, in tutti gli scenari) raggiunge variazioni di temperatura di qualche centesimo di grado, che arrivano fino a 1°C nel caso di aree non sottoposte all'effetto del vento (cortili), in particolar modo se dotate di verde urbano preesistente;
- la maggiore mitigazione è raggiunta quando vengono installati in modo combinato tetti verdi e *living wall* (i.e., scenario MI3). Lo scenario MI3 mostra infatti come l'effetto della parete verde nel *canyon* urbano si combini con l'effetto puntuale legato all'installazione del tetto verde.

Anche per la giornata tipica con ondata di calore è stata valutata la concentrazione di biossido di carbonio nello scenario base (Figura 161) e poi questa è stata confrontata con le concentrazioni di CO_2 nei tre scenari di mitigazione: MI1, MI2 e MI3.

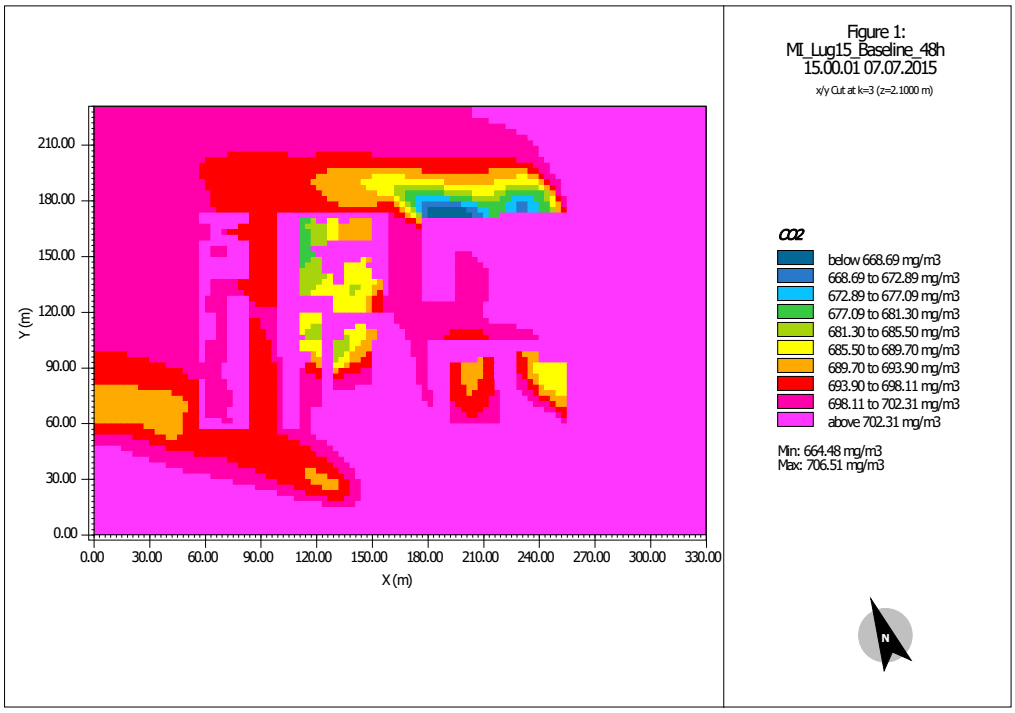


Figura 161. Concentrazione di CO_2 (mg/m^3) dell'aria all'altezza del pedone (i.e., 2.1 m) scenario *baseline* ore 15.00 del 07/07/2015

La Figura 161 mostra che l'area urbana selezionata è interessata da concentrazioni di biossido di carbonio pressoché costanti e dell'ordine di circa 690-700 mg/m^3. Tali valori sono probabilmente influenzati dalla direzione del vento e dalla presenza di alberature esistenti, nonché dalla presenza di cortili chiusi. Lo scenario base è stato confrontato con lo scenario MI1 e mostrato in Figura 162.

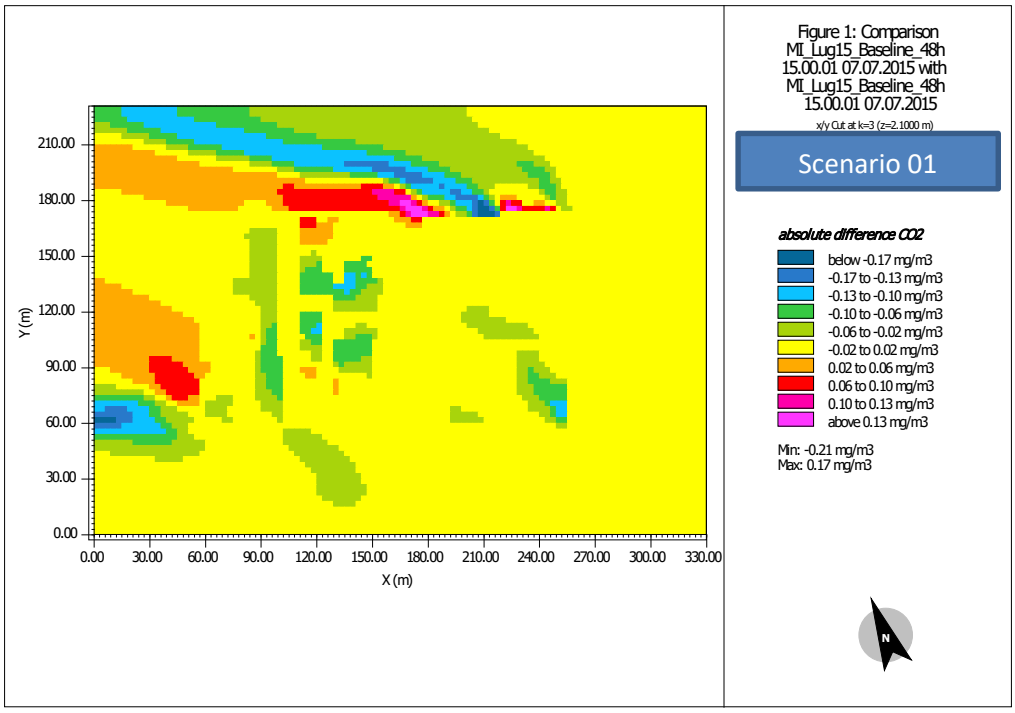


Figura 162. Confronto tra concentrazione di CO_2 (mg/m^3) dell'aria all'altezza del pedone (i.e., 2.1 m) tra scenario *baseline* e scenario MI1 ore 15.00 del 07/07/2015

La Figura 162 mostra che l'applicazione dello scenario MI1 determina una variazione della concentrazione della CO_2 nell'aria nelle zone interessate dalla presenza di *canyon* urbani verdi tra -0.06 e -0.02 mg/m^3. Diminuzione più significative sono presenti in zone più periferiche dell'area stessa (e.g., N/NE), probabilmente dovute all'effetto del vento.
L'applicazione degli scenari MI2 e MI3, che prevede l'installazione verde parietale sul secondo *canyon* urbano, determina una variazione molto limitata, osservando che praticamente tutta l'area è caratterizzata da una variazione compresa tra (circa) -0.2 e +1 mg/m^3 di CO_2 (Figura 163 e Figura 164).

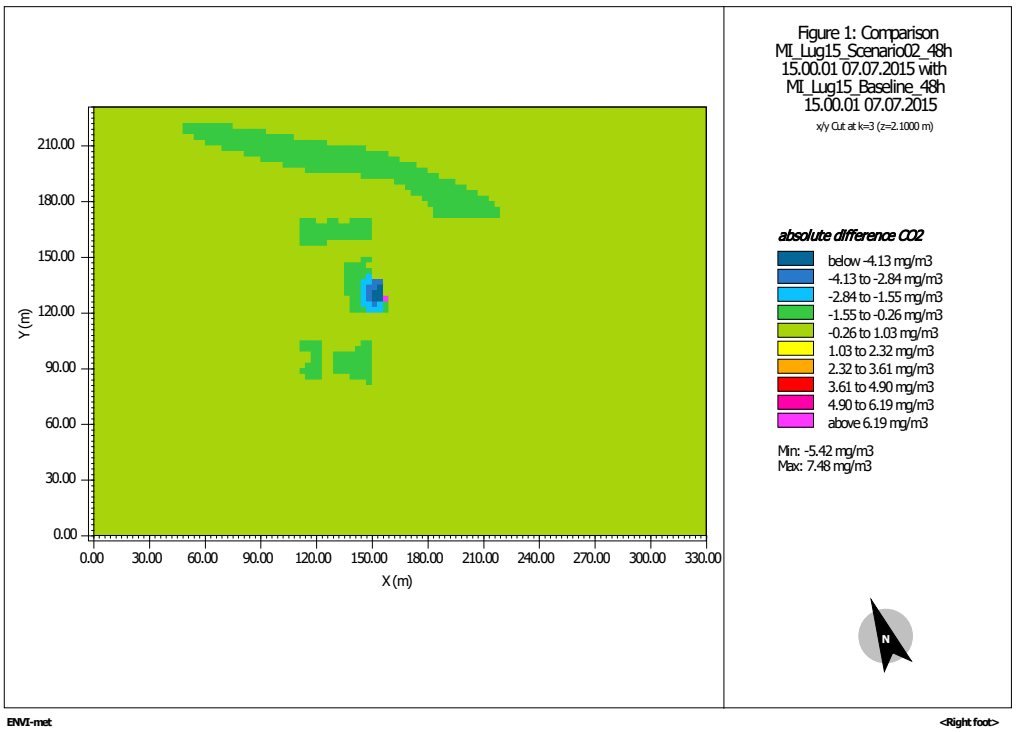


Figura 163. Confronto tra concentrazione di CO_2 (mg/m^3) dell'aria all'altezza del pedone (i.e., 2.1 m) tra scenario *baseline* e scenario MI2 ore 15.00 del 07/07/2015

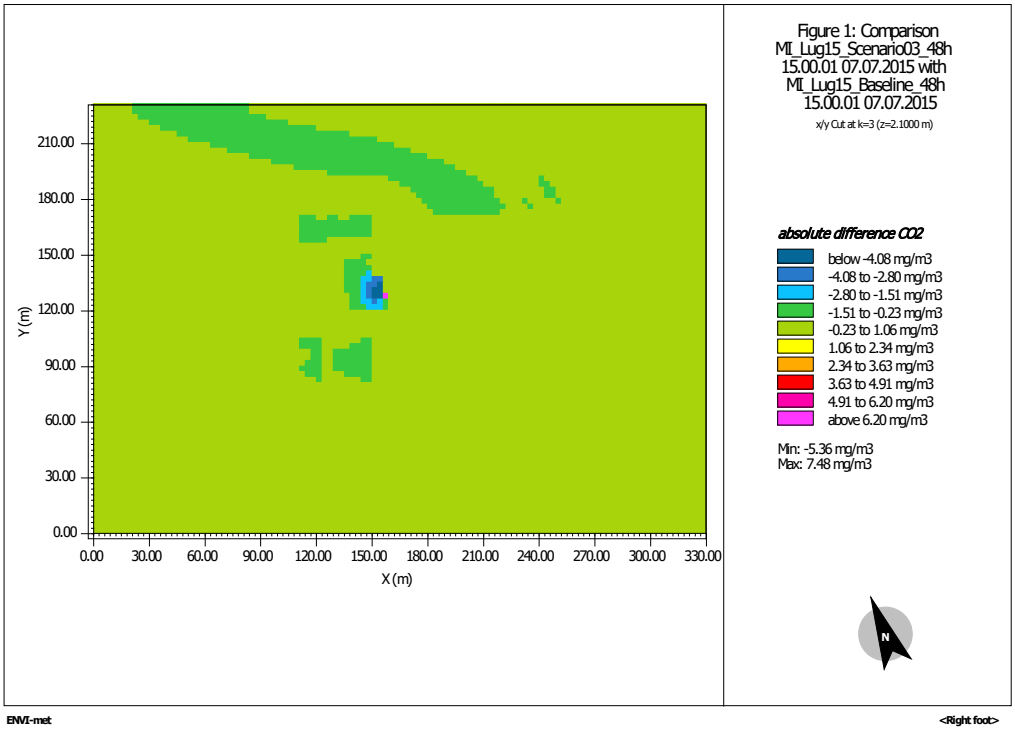


Figura 164. Confronto tra concentrazione di CO_2 (mg/m^3) dell'aria all'altezza del pedone (i.e., 2.1 m) tra scenario *baseline* e scenario MI3 ore 15.00 del 07/07/2015

7.4 Risultati generali

Gli scenari applicati all'area urbana selezionata di Roma hanno mostrato che:
- l'applicazione di facciate verdi isolate non contribuisce in modo significativo alla mitigazione dell'isola di calore urbana. Pertanto, politiche urbane che mirano alla riduzione delle temperature locali dovrebbero promuovere l'applicazione sistematica delle stesse;
- i tetti verdi estensivi, se pur applicati all'intera area di studio, si sono rivelati solo parzialmente efficaci nel mitigare la UHI. Il maggior limite, in questo caso, è rappresentato dall'altezza degli edifici sui quali questi vengono installati. Pertanto, politiche urbane che mirano ad un'efficace mitigazione delle UHI dovrebbero considerare le altezze degli edifici e promuovere la loro installazione maggiormente su edifici di altezze più limitate;
- dal confronto tra gli scenari RM2 e RM3 risulta evidente l'importanza del fattore di scala. Ovvero, una più estesa applicazione delle strategie verdi di involucro è in grado di essere maggiormente efficace nel diminuire le temperature locali;
- le strategie verdi di involucro risultano essere maggiormente efficaci nel mitigare le temperature dell'aria in corrispondenza di giornate calde (i.e., in estate e durante ondate di calore) che in inverno quando l'attività biologica delle specie verdi è notevolmente ridotta e quando la radiazione solare incidente è inferiore;
- l'applicazione degli scenari di mitigazione dell'UHI hanno effetto nullo sulla concentrazione di CO_2 nell'aria. Tale considerazione prescinde dallo scenario stesso e dalla scala di applicazione. Al contrario, la presenza di alberature stradali mostra come questi siano efficaci nel mitigare la concentrazione di biossido di carbonio in aree urbane. Pertanto, i decisori urbani che mirano alla mitigazione della CO_2 nelle città devono focalizzare i propri sforzi nell'aumentare la vegetazione urbana piuttosto che puntare su soluzioni verdi d'involucro.

Dall'analisi degli *output* di ENVI-met per l'area urbana di Torino è risultato che per tutte le tre giornate tipiche:
- l'applicazione di *living wall* e di *green façade* in un *canyon* urbano parallelo alla direzione principale del vento hanno effetti pressoché simili e comportano una riduzione della temperatura media dell'aria su tutta l'area circostante, con relativa riduzione dell'isola di calore urbana;
- l'applicazione di un living wall in un canyon urbano ortogonale alla direzione principale del vento comporta una riduzione dell'isola di calore; tale mitigazione è maggiore in inverno e minore in corrispondenza di giornate calde (i.e., in estate e durante ondate di calore);
- l'applicazione di strategie verdi di involucro in un *canyon* parallelo al vento risultano essere maggiormente efficaci nel mitigare le temperature dell'aria in corrispondenza di giornate calde (i.e., in estate e durante ondate di calore) che in inverno;
- confrontando l'applicazione di un *living wall* in *canyon* parallelo e in *canyon* ortogonale alla direzione principale del vento, l'applicazione in *canyon* parallelo è più efficace in giornate calde (i.e., in estate e durante ondate di calore), in inverno l'effetto di mitigazione dell'isola di calore è invece simile per entrambe le applicazioni;
- in tutti i casi l'effetto di mitigazione è particolarmente rilevante all'interno del canyon di installazione, ed è indipendente dal tipo di parete verde adottata; durante le giornate calde (i.e., in estate e durante ondate di calore) la mitigazione all'interno del canyon è maggiore in un canyon parallelo alla direzione principale del vento; in inverno la mitigazione all'interno del *canyon* è maggiore in un canyon perpendicolare alla direzione principale del vento.

Lo studio degli scenari del caso di Milano ha mostrato che:
- nel caso di giornate calde (i.e. giornata tipica estiva e ondata di calore), i risultati più apprezzabili in termini di riduzione dell'isola di calore si realizzano con l'installazione di *living wall* in un *canyon* urbano continuo e di larghezza ridotta;
- gli effetti più importanti appaiono dovuti alla combinazione di nuove realizzazioni verdi con elementi di contesto urbano, quali la presenza di aree chiuse (cortili), la presenza di verde urbano preesistente e la direzione del vento;
- nella giornata invernale la realizzazione di pareti verdi non incide sulla riduzione dell'isola di calore urbana. Nel caso di grande concentrazione di verde (combinazione di pareti verdi in un *canyon* urbano con adiacente tetto verde, i.e. MI3) si può osservare un innalzamento della temperatura media dell'aria nell'area considerata;

- in termini di riduzione della concentrazione di CO_2 nessuno degli scenari individuati ha mostrato effetti apprezzabili, a meno di condizioni particolari di conformazione urbana e distribuzione del vento.

8 Effetto degli scenari di mitigazione sull'uso di energia degli edifici

La valutazione dell'effetto degli scenari di mitigazione sull'uso di energia degli edifici è stata realizzata utilizzando un *software* sviluppato per ENEA dall'Università degli Studi di Catania nel corso del PAR 2012-14 (per una descrizione dettagliata vedere [31]) e modificato da ENEA nel corso del PAR 2015 [32], [33]. Il *software* è basato sull'implementazione del modello di simulazione proposto dalla Norma Internazionale UNI EN 13790:2008 [34].
Per ciascuna città, Torino, Milano e Roma, è stato considerato un singolo edificio, rappresentativo di gran parte del parco edilizio della città stessa (i.e., archetipo). È stata quindi simulata la prestazione energetica di tali edifici a partire da una situazione *baseline*, e poi in seguito all'applicazione degli scenari di mitigazione oggetto di simulazione con ENVI-met; l'applicazione degli scenari è stata implementata nel *software* sia in termini di modifica delle caratteristiche termofisiche degli edifici, sia in termini di variazione dei valori di temperatura dell'aria esterna, come risultante dalle simulazioni con ENVI-met.
Per la valutazione energetica qui presentata, tra gli *output* forniti dal *software*, sono stati considerati i valori del carico sensibile di riscaldamento e di raffrescamento, in termini di energia termica utile. A tali valori sono poi stati associati i rendimenti impiantistici per ottenere l'energia termica totale in ingresso al generatore.
I valori di fabbisogno, sia di riscaldamento sia di raffrescamento, sono stati calcolati per il giorno medio mensile di ciascun mese e poi estesi all'intero mese oppure alla frazione dello stesso in cui gli impianti di riscaldamento o raffrescamento sono considerabili in funzione.

8.1 Scenari baseline

Per ciascuna delle tre città sono stati simulati uno o più scenari *baseline*.
Nel caso di Torino sono stati simulati uno scenario *baseline* con l'edificio orientato lungo la direzione Nord-Sud (Baseline_TO1-2) ed uno scenario baseline con l'edificio orientato lungo la direzione Est-Ovest (Baseline_TO3).
Nel caso di Milano è stato simulato uno scenario *baseline* con l'edificio orientato lungo la direzione Nord-Sud.
Nel caso di Roma è stato simulato uno scenario *baseline* con l'edificio orientato lungo la direzione Nord-Sud.

8.1.1 Gli edifici simulati

Per le valutazioni energetiche degli scenari *baseline* è stato simulato l'edificio residenziale rappresentativo di gran parte del parco edilizio di ciascuna delle tre città, Roma, Torino e Milano, identificato nel corso della LA2.7 [15]. Gli edifici rappresentativi di tutte e tre le città sono considerati essere dotati di impianto centralizzato di riscaldamento alimentato a metano, con un generatore a condensazione, distribuzione a colonne montanti e corpi radianti quali terminali di emissione [15]; relativamente al raffrescamento estivo, è stato ipotizzato l'utilizzo di sistemi autonomi aria-aria a split. Le caratteristiche geometriche, termofisiche ed impiantistiche di ciascuno degli edifici rappresentativi sono riassunte in Tabella 40.

Tabella 40. Principali caratteristiche geometriche, termofisiche ed impiantistiche degli edifici rappresentativi – scenari baseline

	Roma	Torino	Milano
Altezza [m]	15.3	12.3	15.3
Profondità [m]	10	12	12
Larghezza [m]	20	24	24
Superficie lorda di piano [m²]	200	288	288
Superficie netta di piano [m²]	170	240	240
Superficie utile [m²]	850	960	1200
Copertura	Piana – verso ambiente esterno	Inclinata – Sottotetto non riscaldato	Inclinata – Sottotetto non riscaldato
Superficie disperdente orizzontale (contro terreno) [m²]	200	288	288
Superficie disperdente orizzontale (verso sottotetto o tetto piano) [m²]	200	288	288
Superficie disperdente verticale opaca [m²]	811.7	765.6	951.6

Superficie disperdente verticale trasparente [m²]	106.3	120	150
Trasmittanza parete esterna [W·m⁻²·K⁻¹]	1.100	1.180	1.180
Trasmittanza chiusura orizzontale inferiore [W·m⁻²·K⁻¹]	1.450	1.450	1.450
Trasmittanza chiusura orizzontale superiore [W·m⁻²·K⁻¹]	1.610	1.610	1.610
Trasmittanza infissi [W·m⁻²·K⁻¹]	4.900	4.900	4.900
Riscaldamento: rendimento di emissione [-]	0.950	0.950	0.950
Riscaldamento: rendimento di regolazione [-]	0.990	0.990	0.990
Riscaldamento: rendimento di distribuzione [-]	0.970	0.970	0.970
Riscaldamento: rendimento di generazione (rispetto a energia utile) [-]	1.040	1.040	1.040
Raffrescamento: rendimento di emissione [-]	0.970	0.970	0.970
Raffrescamento: rendimento di regolazione [-]	0.980	0.980	0.980
Raffrescamento: rendimento di distribuzione [-]	1.000	1.000	1.000
Raffrescamento: rendimento di generazione (rispetto a energia utile) [-]	4.700	4.700	4.700

Per gli edifici rappresentativi di tutte e tre le città sono inoltre stati assunti i valori termofisici di input del *software* sintetizzati in Tabella 41.

Tabella 41. Fattori di *input* comuni ai tre edifici - scenari *baseline*

Fattore di riduzione degli apporti solari – F_{sh} – parete verticale [-]	0.9
Fattore di riduzione degli apporti solari – F_{sh} – tetto piano [-]	1.0
Fattore di trasmittanza solare delle finestre – g [-]	0.85
Fattore di assorbiento – pareti verticali e tetto piano - a [-]	0.30

8.1.2 Dati meteorologici

I dati meteorologici utilizzati come *input* del *software* sono i valori orari dei giorni medi mensili, per le tre città (i.e., Torino, Milano e Roma), calcolati a partire dai rispettivi anni climatici tipo [35] di temperatura dell'aria e radiazione globale sul piano orizzontale.
Nello specifico, sono stati utilizzati i valori riportati nelle tabelle da Tabella 42 a Tabella 47.

Tabella 42. Torino, temperatura dell'aria [°C] nei giorni medi mensili degli scenari *baseline*

Ora	Gen.	Feb.	Mar.	Apr.	Mag.	Giu.	Luglio	Agosto	Sett.	Ott.	Nov.	Dic.
00.00	0.00	1.18	5.38	9.46	14.74	18.45	20.04	19.31	15.71	9.82	5.34	1.13
01.00	-0.31	0.86	5.13	8.89	14.28	17.88	19.20	18.62	15.49	9.37	5.25	0.94
02.00	-0.46	0.70	4.85	8.52	13.58	17.37	18.45	18.23	15.13	8.99	5.09	0.73
03.00	-0.58	0.30	4.65	8.15	13.20	17.00	17.85	17.73	14.78	8.76	4.87	0.57
04.00	-0.80	0.02	4.41	7.89	12.67	16.85	17.63	17.35	14.60	8.53	4.75	0.66
05.00	-0.95	-0.23	4.19	7.69	13.30	17.77	18.38	17.42	14.36	8.37	4.67	0.68
06.00	-0.91	-0.35	4.43	8.57	15.18	19.56	20.17	18.95	15.00	8.45	4.49	0.54
07.00	-0.88	-0.25	5.82	9.99	17.02	21.50	22.17	21.01	16.64	9.54	4.57	0.55
08.00	-0.21	0.66	7.75	11.60	18.77	22.85	23.91	23.07	18.79	11.17	5.29	1.05
09.00	1.08	1.93	9.38	12.88	20.04	23.85	25.14	24.68	20.70	13.30	6.31	2.14

10.00	2.33	3.57	10.79	13.98	21.03	24.80	26.16	25.68	22.19	15.05	7.57	3.44
11.00	2.88	5.15	11.91	14.69	21.71	25.67	27.09	26.44	23.33	16.25	8.75	4.69
12.00	3.76	6.43	12.66	15.45	22.24	26.35	27.99	27.00	24.22	17.04	9.82	5.93
13.00	4.32	7.55	13.32	15.98	22.69	26.79	28.58	27.34	24.79	17.49	10.47	6.78
14.00	4.46	8.20	13.59	16.21	22.64	27.05	28.91	27.53	25.16	17.77	10.88	7.02
15.00	4.22	8.20	13.64	16.32	22.65	27.17	28.96	27.49	25.14	17.48	10.39	6.57
16.00	3.46	7.43	12.88	16.08	22.35	26.93	28.95	27.28	24.50	16.45	9.33	5.29
17.00	2.69	6.00	11.18	15.44	21.38	26.26	28.37	26.72	22.72	14.85	8.47	4.40
18.00	2.13	4.88	9.39	14.18	20.11	24.87	27.24	24.95	20.64	13.43	7.73	3.41
19.00	1.43	3.81	8.35	12.96	18.64	23.22	25.24	23.02	19.25	12.36	7.10	2.76
20.00	0.98	3.15	7.55	11.96	17.66	21.74	23.68	21.95	18.25	11.57	6.60	2.19
21.00	0.74	2.73	6.96	11.23	16.76	20.66	22.52	21.17	17.38	10.86	6.18	1.73
22.00	0.46	2.09	6.40	10.73	16.05	19.80	21.59	20.71	16.55	10.42	5.74	1.45
23.00	0.20	1.67	5.97	10.07	15.31	19.02	20.96	20.04	15.94	10.14	5.42	1.24

Tabella 43. Torino, radiazione globale [Wh/m²] nei giorni medi mensili degli scenari *baseline*

Ora	Gen.	Feb.	Mar.	Apr.	Mag.	Giu.	Luglio	Agosto	Sett.	Ott.	Nov.	Dic.
00.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
01.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
02.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
03.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
04.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
05.00	0.00	0.00	0.00	34.54	67.12	118.60	98.33	41.18	5.19	0.00	0.00	0.00
06.00	0.00	0.00	23.42	115.32	221.26	269.31	260.23	186.03	64.67	29.45	0.00	0.00
07.00	5.35	33.81	130.86	259.01	374.30	421.05	416.38	357.82	209.44	75.35	32.48	0.54
08.00	65.47	130.22	250.57	382.65	522.59	561.75	553.47	517.19	345.74	214.65	84.00	49.85
09.00	144.97	231.44	352.35	489.39	615.76	674.84	672.04	641.89	469.07	332.75	167.82	148.63
10.00	209.30	314.39	452.99	558.19	660.68	751.84	779.53	722.13	569.91	385.29	224.88	199.97
11.00	230.85	362.72	504.85	596.60	702.05	781.74	814.57	706.82	588.12	399.48	246.02	215.63
12.00	231.57	344.49	465.80	587.40	639.85	725.37	794.50	672.42	559.93	376.13	243.64	198.29
13.00	205.67	311.00	420.35	504.70	526.10	645.28	723.81	582.91	480.52	315.33	187.85	160.79
14.00	129.20	246.02	322.72	414.80	435.27	519.77	605.02	506.61	395.32	224.51	121.12	91.55
15.00	44.92	138.35	210.35	294.22	339.71	406.77	450.90	344.29	256.41	115.96	29.08	16.99
16.00	1.65	27.21	101.55	164.35	221.85	263.95	304.38	213.04	111.32	19.56	0.00	0.00
17.00	0.00	0.00	9.26	51.78	107.18	134.85	156.30	92.47	14.40	0.00	0.00	0.00
18.00	0.00	0.00	0.00	1.05	18.62	38.67	45.25	8.10	0.00	0.00	0.00	0.00
19.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	0.03	0.40	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
20.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
21.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
22.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
23.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Tabella 44. Milano, temperatura dell'aria [°C] nei giorni medi mensili degli scenari *baseline*

Ora	Gen.	Feb.	Mar.	Apr.	Mag.	Giu.	Luglio	Agosto	Sett.	Ott.	Nov.	Dic.
00.00	3.27	6.63	9.56	12.24	17.79	21.30	23.20	23.21	18.43	13.34	7.25	3.13
01.00	3.00	6.36	8.95	11.93	17.32	20.81	22.56	22.58	17.94	13.05	7.05	2.90
02.00	2.82	6.16	8.61	11.57	16.93	20.20	22.05	22.09	17.50	12.77	6.87	2.73
03.00	2.74	5.83	8.33	11.21	16.65	19.72	21.50	21.67	17.21	12.55	6.73	2.47
04.00	2.52	5.53	8.02	10.78	16.38	19.24	21.13	21.24	17.00	12.41	6.55	2.18
05.00	2.29	5.20	7.83	10.49	16.04	18.96	20.84	20.93	16.79	12.21	6.53	2.05
06.00	2.07	5.02	7.35	10.31	15.92	19.05	20.81	20.68	16.50	12.12	6.49	1.89
07.00	2.05	4.81	7.28	10.53	16.32	19.68	21.39	20.91	16.42	12.02	6.37	1.81
08.00	2.04	4.80	7.62	11.25	17.29	20.53	22.22	21.93	17.05	12.32	6.30	1.92
09.00	2.10	5.17	8.35	12.23	18.20	21.68	23.37	23.06	18.09	12.97	6.52	2.09
10.00	3.04	5.88	9.40	13.22	19.25	22.70	24.31	24.06	19.17	13.75	7.14	2.99
11.00	4.13	6.78	10.39	14.13	20.30	23.71	25.38	25.11	20.24	14.56	7.65	3.75
12.00	5.50	7.66	11.43	15.02	21.29	24.53	26.31	26.13	21.35	15.30	8.09	4.46

13.00	6.33	8.66	12.56	15.91	22.07	25.23	26.94	26.72	22.40	15.95	8.51	4.86
14.00	6.74	9.29	13.52	16.37	22.58	26.11	27.65	27.52	23.20	16.43	8.96	5.33
15.00	6.98	9.67	14.20	16.55	23.08	26.55	28.05	27.79	23.75	16.72	9.03	5.51
16.00	6.76	9.89	14.43	16.50	22.96	26.64	27.93	27.63	23.78	16.69	9.05	5.37
17.00	6.14	9.75	14.39	16.36	22.57	26.42	27.87	27.50	23.47	16.35	8.71	4.88
18.00	5.30	9.08	13.80	16.01	22.23	26.02	27.64	27.05	22.84	15.77	8.31	4.55
19.00	4.75	8.48	12.90	15.14	21.70	25.47	27.04	26.32	21.95	15.20	8.09	4.42
20.00	4.34	8.08	12.17	14.39	20.67	24.73	25.90	25.46	21.18	14.72	7.91	4.26
21.00	3.94	7.69	11.47	13.82	19.70	23.67	25.13	24.87	20.53	14.31	7.68	4.00
22.00	3.72	7.31	10.90	13.25	19.17	22.80	24.48	24.33	19.72	13.86	7.47	3.67
23.00	3.36	6.92	10.14	12.71	18.63	22.09	23.98	23.71	18.99	13.51	7.30	3.33

Tabella 45. Milano, radiazione globale [Wh/m^2] nei giorni medi mensili degli scenari *baseline*

Ora	Gen.	Feb.	Mar.	Apr.	Mag.	Giu.	Luglio	Agosto	Sett.	Ott.	Nov.	Dic.
00.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
01.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
02.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
03.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
04.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
05.00	0.00	0.00	0.00	0.07	2.19	3.57	2.10	1.03	0.00	0.00	0.00	0.00
06.00	0.00	0.00	0.55	5.60	32.55	50.57	35.58	10.00	0.43	1.87	0.00	0.00
07.00	0.03	0.46	8.03	58.33	124.35	162.80	149.42	84.94	30.00	5.74	0.00	1.26
08.00	0.68	11.21	70.35	162.20	251.65	321.93	288.77	227.65	136.80	58.37	2.90	3.68
09.00	24.13	84.89	180.97	302.63	355.26	470.63	440.81	378.65	279.57	144.92	40.07	31.23
10.00	96.19	179.04	289.42	408.17	488.71	588.33	560.68	494.42	398.10	233.13	109.37	93.65
11.00	179.58	258.18	387.32	514.80	574.10	682.63	703.58	609.97	506.53	287.31	162.93	157.23
12.00	241.74	327.93	452.45	579.67	630.81	718.40	753.35	661.52	580.33	336.36	203.43	192.26
13.00	272.52	352.14	481.29	595.50	647.52	708.63	768.48	674.32	591.27	349.12	222.90	201.13
14.00	265.61	335.64	497.48	572.63	590.35	707.73	766.10	639.26	568.23	325.05	211.67	175.19
15.00	204.72	277.19	415.45	488.83	575.77	609.73	674.71	546.84	487.53	259.29	159.07	120.12
16.00	69.94	161.47	288.42	377.70	450.77	529.83	547.90	428.45	361.87	165.19	67.94	28.65
17.00	27.19	58.60	133.58	266.09	327.00	391.17	417.94	324.65	206.13	55.03	4.87	0.00
18.00	0.00	0.71	68.55	100.03	192.74	255.23	261.38	159.43	53.95	1.48	0.00	0.00
19.00	0.00	0.00	0.00	23.33	52.24	106.58	81.85	50.09	0.00	0.00	0.00	0.00
20.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	30.53	18.84	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
21.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
22.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
23.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Tabella 46. Roma, temperatura dell'aria [°C] nei giorni medi mensili degli scenari *baseline*

Ora	Gen.	Feb.	Mar.	Apr.	Mag.	Giu.	Luglio	Agosto	Sett.	Ott.	Nov.	Dic.
00.00	6.72	7.84	9.84	13.97	16.75	19.98	23.73	24.04	19.70	15.67	11.27	7.15
01.00	6.42	7.52	9.44	13.48	16.22	19.32	23.06	23.36	19.17	15.41	11.00	6.81
02.00	6.23	7.27	8.98	13.04	15.76	18.69	22.43	22.74	18.74	15.07	10.73	6.58
03.00	5.97	6.90	8.63	12.55	15.29	18.32	21.87	22.29	18.36	14.71	10.51	6.32
04.00	5.88	6.54	8.47	12.03	14.79	17.96	21.43	21.90	18.02	14.42	10.45	6.06
05.00	5.71	6.25	8.15	11.87	14.71	18.18	21.46	21.62	17.69	14.16	10.07	5.93
06.00	5.59	6.13	8.14	12.18	15.54	19.24	22.33	22.32	17.83	14.15	9.92	5.64
07.00	5.65	6.04	8.74	13.18	16.86	20.68	23.89	23.45	18.90	14.66	10.07	5.67
08.00	6.02	6.68	9.89	14.89	18.54	22.35	25.72	25.38	20.57	16.13	10.86	6.03
09.00	6.90	7.77	11.42	16.51	20.02	23.85	27.51	27.33	22.19	17.77	11.94	6.96
10.00	8.06	9.08	12.69	17.80	21.17	25.03	29.10	28.91	23.70	19.39	13.30	8.28
11.00	8.93	10.49	13.50	18.69	22.01	25.84	30.16	30.14	24.52	20.55	14.41	9.77
12.00	9.90	11.53	14.11	19.14	22.63	26.35	30.66	30.99	25.22	21.32	15.21	11.16
13.00	10.60	12.20	14.51	19.60	22.92	26.66	30.85	30.91	25.56	21.93	15.79	12.25
14.00	11.11	12.38	14.70	19.67	23.01	26.48	30.82	30.73	25.52	22.13	16.01	12.77

15.00	11.35	12.18	14.58	19.45	22.90	26.16	30.46	30.35	25.10	21.69	15.81	12.74
16.00	10.78	11.73	14.23	18.73	22.56	25.51	29.91	30.06	24.48	20.78	14.93	12.02
17.00	10.06	11.09	13.61	18.15	21.85	24.74	29.22	29.58	23.65	19.67	14.17	11.18
18.00	9.51	10.49	12.91	17.37	21.17	24.20	28.43	28.64	22.89	19.02	13.67	10.51
19.00	8.98	10.04	12.40	16.64	20.40	23.26	27.30	27.60	22.30	18.63	13.26	9.81
20.00	8.52	9.51	11.96	16.06	19.69	22.49	26.35	26.78	21.82	18.02	12.69	9.18
21.00	7.94	8.96	11.54	15.54	18.96	21.89	25.72	26.15	21.29	17.21	12.19	8.58
22.00	7.56	8.52	11.09	15.03	18.27	21.28	25.10	25.53	20.64	16.53	11.90	8.04
23.00	7.39	8.19	10.53	14.50	17.57	20.77	24.50	24.70	20.10	16.05	11.54	7.51

Tabella 47. Roma, radiazione globale [Wh/m^2] nei giorni medi mensili degli scenari *baseline*

Ora	Gen.	Feb.	Mar.	Apr.	Mag.	Giu.	Luglio	Agosto	Sett.	Ott.	Nov.	Dic.
00.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
01.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
02.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
03.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
04.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
05.00	0.00	0.00	0.00	9.23	50.39	77.08	59.16	16.99	1.13	0.00	0.00	0.00
06.00	0.00	0.08	16.45	96.51	174.22	231.15	215.98	131.62	58.56	12.87	3.48	0.00
07.00	3.95	28.33	116.48	241.38	323.59	404.27	403.70	311.06	207.58	110.79	29.91	6.18
08.00	68.48	115.21	281.68	403.77	465.96	541.40	573.85	487.42	360.35	272.98	140.20	70.81
09.00	174.60	223.60	405.99	524.01	586.70	667.47	729.87	648.20	488.53	364.69	226.94	164.35
10.00	255.15	311.37	482.98	598.66	657.30	771.76	837.63	732.43	586.14	455.06	300.23	252.03
11.00	280.89	404.17	519.31	627.62	719.83	823.45	895.01	776.77	626.55	496.11	346.13	326.13
12.00	312.05	404.56	513.28	620.82	681.66	836.35	837.75	764.08	657.17	476.08	319.40	320.79
13.00	276.21	382.92	458.85	618.03	622.04	780.06	863.50	702.04	589.59	434.63	288.16	271.85
14.00	222.31	323.38	361.21	570.94	599.31	656.45	773.31	636.87	499.40	331.91	209.24	179.72
15.00	132.74	211.37	291.19	433.37	492.55	548.25	634.06	531.77	367.39	221.57	95.82	81.99
16.00	33.00	102.65	166.64	276.39	339.06	387.21	459.73	377.11	224.51	86.29	18.02	7.45
17.00	0.32	10.33	58.14	145.46	181.05	244.44	282.59	207.24	80.09	8.39	0.00	0.00
18.00	0.00	0.00	2.12	20.89	64.84	111.80	123.92	57.03	5.14	0.00	0.00	0.00
19.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.87	15.51	14.06	0.84	0.00	0.00	0.00	0.00
20.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
21.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
22.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
23.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

8.2 Scenari di mitigazione

Gli scenari di mitigazione considerati sono quelli simulati con i modelli ENVI-met, descritti in dettaglio in [15], che possono essere sintetizzati come segue:

- Scenario TO1: installazione di *living wall* in *canyon* urbano in una via parallela alla direzione principale del vento (via Beaulard);
- Scenario TO2: installazione di *green façade* in *canyon* urbano in una via parallela alla direzione principale del vento (via Beaulard);
- Scenario TO3: Installazione di *living wall* in *canyon* urbano in una via perpendicolare alla direzione principale del vento (via Lera);
- Scenario MI1: installazione di *living wall* in *canyon* urbano (via Bellinzaghi);
- Scenario MI2: installazione di *living wall* in un *canyon* urbano più ampio (via Bassi);
- Scenario MI3: installazione di *living wall* in un *canyon* urbano (via Bassi) e di un tetto verde estensivo su un singolo edificio affacciato sul *canyon* urbano;
- Scenario RM1: installazione estensiva di tetti verdi;
- Scenario RM2: installazione estensiva di tetti verdi e di *green façade*;
- Scenario RM3: installazione di *green façade* su un solo edificio.

Per quanto riguarda le caratteristiche termofisiche, l'applicazione degli scenari di mitigazione si è tradotta nell'adozione, per l'edificio simulato, dei parametri termofisici e di *input* riassunti in Tabella 48.

Tabella 48. Caratteristiche termofisiche utilizzate per l'applicazione degli scenari di mitigazione

	Applicazione Living Wall	**Applicazione Green Façade**	**Applicazione Green Roof**
Trasmittanza parete esterna [$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$]	0.605	Come per lo scenario baseline	Come per lo scenario baseline
Trasmittanza chiusura orizzontale superiore [$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$]	Come per lo scenario baseline	Come per lo scenario baseline	0.776
Fattore di riduzione degli apporti solari – F_{sh} – parete verticale [-]	0.5[1]	0.5[1]	Come per lo scenario baseline
Fattore di assorbimento – a [-]	0.35	0.35	0.35
[1] Sia nel caso della green façade, la cui specie vegetale adottata è edera, sia nel caso del living wall con fioriere, la cui specie vegetale è felce, il fattore di riduzione degli apporti solari adottato è 0.5 [36] ed è considerato costante per tutto l'anno in quanto le specie vegetali adottate sono sempreverdi.			

Le trasmittanze ed i parametri di *input* legati all'adozione degli elementi di involucro verde illustrati in Tabella 48, sono stati applicati su una o più superfici disperdenti (verticali o orizzontali) dell'edificio simulato, secondo quanto riassunto in Tabella 54. Per gli scenari che prevedevano l'applicazione di un *green wall* in *canyon* urbano (TO1, TO2, TO3, MI1, MI2, MI3), è stata considerata l'applicazione del *green wall* sulla parete rivolta verso il *canyon*, con l'edificio rappresentativo collocato su un lato oppure sull'altro del *canyon* stesso.

Tabella 49. Caratteristiche degli edifici simulati in ciascuno scenario

Scenario	**Caratteristiche dell'edificio**
Baseline_TO1-2	Edificio rappresentativo per Torino[1] Asse principale dell'edificio orientato Nord-Sud
TO1-E	Edificio rappresentativo per Torino [1] con living wall applicato sulla parete Est[2] Asse principale dell'edificio orientato Nord-Sud
TO1-W	Edificio rappresentativo per Torino [1] con living wall applicato sulla parete Ovest[2] Asse principale dell'edificio orientato Nord-Sud
TO2-E	Edificio rappresentativo per Torino [1] con green façade applicata sulla parete Est[2] Asse principale dell'edificio orientato Nord-Sud
TO2-W	Edificio rappresentativo per Torino [1] con green façade applicata sulla parete Ovest[2] Asse principale dell'edificio orientato Nord-Sud
Baseline_TO3	Edificio rappresentativo per Torino [1] Asse principale dell'edificio orientato Est-Ovest
TO3-N	Edificio rappresentativo per Torino [1] con living wall applicato sulla parete Nord[2] Asse principale dell'edificio orientato Est-Ovest
TO3-S	Edificio rappresentativo per Torino [1] con living wall applicato sulla parete Sud[2] Asse principale dell'edificio orientato Est-Ovest
Baseline_MI	Edificio rappresentativo per Milano [1] Asse principale dell'edificio orientato Nord-Sud
MI1-E	Edificio rappresentativo per Milano [1] con living wall applicato sulla parete Est[2] Asse principale dell'edificio orientato Nord-Sud
MI1-W	Edificio rappresentativo per Milano [1] con living wall applicato sulla parete Ovest[2] Asse principale dell'edificio orientato Nord-Sud
MI2-E	Edificio rappresentativo per Milano [1] con living wall applicato sulla parete Est[2] Asse principale dell'edificio orientato Nord-Sud
MI2-W	Edificio rappresentativo per Milano [1] con living wall applicato sulla parete Ovest[2] Asse principale dell'edificio orientato Nord-Sud
MI3-E	Edificio rappresentativo per Milano [1] con living wall applicato sulla parete Est[2] Asse principale dell'edificio orientato Nord-Sud
MI3-W	Edificio rappresentativo per Milano [1] con living wall applicato sulla parete Ovest[2] Asse principale dell'edificio orientato Nord-Sud
Baseline_RM	Edificio rappresentativo per Roma [1]; asse principale dell'edificio orientato Nord-Sud

RM1	Edificio rappresentativo per Roma [1] con green roof applicato sul tetto piano[2] Asse principale dell'edificio orientato Nord-Sud
RM2	Edificio rappresentativo per Roma [1] con green roof applicato sul tetto piano e green façade applicata su tutte le pareti[2] Asse principale dell'edificio orientato Nord-Sud
RM2	Edificio rappresentativo per Roma [1] con green façade applicata su tutte le pareti[2] Asse principale dell'edificio orientato Nord-Sud
[1] Come descritto in §8.1.1 e in Tabella 40 [2] Come descritto in Tabella 48	

I principali parametri dimensionali e termofisici di *input* utilizzati per la simulazione dei vari scenari sono riassunti in Tabella 50.

Tabella 50. Principali parametri termofisici di *input* degli scenari simulati

Parete		Baseline_TO1-2	Baseline_TO3	TO1-E	TO1-W	TO2-E	TO2-W	TO3-N	TO3-S	Baseline_MI	MI1-E	MI1-W	MI2-E	MI2-W	MI3-E	MI3-W	Baseline_RM	RM1	RM2	RM3
Opaco Nord		1.180	1.180	1.180	1.180	1.180	1.180	0.605	1.180	1.180	1.180	1.180	1.180	1.180	1.180	1.180	1.100	1.100	1.100	1.100
Trasp. Nord		4.900	4.900	4.900	4.900	4.900	4.900	4.900	4.900	4.900	4.900	4.900	4.900	4.900	4.900	4.900	4.900	4.900	4.900	4.900
Opaco Sud		1.180	1.180	1.180	1.180	1.180	1.180	1.180	0.605	1.180	1.180	1.180	1.180	1.180	1.180	1.180	1.100	1.100	1.100	1.100
Trasp. Sud		4.900	4.900	4.900	4.900	4.900	4.900	4.900	4.900	4.900	4.900	4.900	4.900	4.900	4.900	4.900	4.900	4.900	4.900	4.900
Opaco Est	U	1.180	1.180	0.605	1.180	1.180	1.180	1.180	1.180	1.180	0.605	1.180	0.605	1.180	0.605	1.180	1.100	1.100	1.100	1.100
Trasp. Est	[W/m2 K]	4.900	4.900	4.900	4.900	4.900	4.900	4.900	4.900	4.900	4.900	4.900	4.900	4.900	4.900	4.900	4.900	4.900	4.900	4.900
Opaco Ovest		1.180	1.180	1.180	0.605	1.180	1.180	1.180	1.180	1.180	1.180	0.605	1.180	0.605	1.180	0.605	1.100	1.100	1.100	1.100
Trasp. Ovest		4.900	4.900	4.900	4.900	4.900	4.900	4.900	4.900	4.900	4.900	4.900	4.900	4.900	4.900	4.900	4.900	4.900	4.900	4.900
Pavimento		1.450	1.450	1.450	1.450	1.450	1.450	1.450	1.450	1.450	1.450	1.450	1.450	1.450	1.450	1.450	1.450	1.450	1.450	1.450
Soffitto		1.610	1.610	1.610	1.610	1.610	1.610	1.610	1.610	1.610	1.610	1.610	1.610	1.610	0.776	1.610	1.620	0.776	0.776	1.620
Opaco Nord		1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Trasp. Nord		1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Opaco Sud		1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Trasp. Sud		1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Opaco Est	btr	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Trasp. Est	[-]	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Opaco Ovest		1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Trasp. Ovest		1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Pavimento		0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
Soffitto		0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	1.0	1.0	1.0	1.0
Opaco Nord		127.6	255.2	127.6	127.6	127.6	127.6	255.2	255.2	158.60	158.60	158.60	158.60	158.60	158.60	158.60	135.29	135.29	135.29	135.29
Trasp. Nord		20.0	40.0	20.0	20.0	20.0	20.0	40.0	40.0	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00	17.71	17.71	17.71	17.71
Opaco Sud		127.6	255.2	127.6	127.6	127.6	127.6	255.2	255.2	158.60	158.60	158.60	158.60	158.60	158.60	158.60	135.29	135.29	135.29	135.29
Trasp. Sud		20.0	40.0	20.0	20.0	20.0	20.0	40.0	40.0	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00	17.71	17.71	17.71	17.71
Opaco Est	S	255.2	127.6	255.2	255.2	255.2	255.2	127.6	127.6	317.20	317.20	317.20	317.20	317.20	317.20	317.20	270.58	270.58	270.58	270.58
Trasp. Est	[m2]	40.0	20.0	40.0	40.0	40.0	40.0	20.0	20.0	50.00	50.00	50.00	50.00	50.00	50.00	50.00	35.42	35.42	35.42	35.42
Opaco Ovest		255.2	127.6	255.2	255.2	255.2	255.2	127.6	127.6	317.20	317.20	317.20	317.20	317.20	317.20	317.20	270.58	270.58	270.58	270.58
Trasp. Ovest		40.0	20.0	40.0	40.0	40.0	40.0	20.0	20.0	50.00	50.00	50.00	50.00	50.00	50.00	50.00	35.42	35.42	35.42	35.42
Pavimento		288.0	288.0	288.0	288.0	288.0	288.0	288.0	288.0	288.00	288.00	288.00	288.00	288.00	288.00	288.00	200.00	200.00	200.00	200.00
Soffitto		288.0	288.0	288.0	288.0	288.0	288.0	288.0	288.0	288.00	288.00	288.00	288.00	288.00	288.00	288.00	200.00	200.00	200.00	200.00
Opaco Nord		0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.35	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30
Trasp. Nord		0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85
Opaco Sud		0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.35	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30
Trasp. Sud		0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85
Opaco Est	a o g	0.30	0.30	0.35	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.35	0.30	0.35	0.30	0.35	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30
Trasp. Est	[-]	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85
Opaco Ovest		0.30	0.30	0.30	0.35	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.35	0.30	0.35	0.30	0.35	0.30	0.30	0.30	0.30
Trasp. Ovest		0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85
Pavimento		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Soffitto		0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.35	0.30	0.30	0.35	0.35	0.30
Opaco Nord		0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.50	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.50	0.50
Trasp. Nord		0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90
Opaco Sud		0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.50	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.50	0.50
Trasp. Sud		0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90
Opaco Est	Fsh	0.90	0.90	0.50	0.90	0.50	0.90	0.90	0.90	0.90	0.50	0.90	0.50	0.90	0.50	0.90	0.90	0.90	0.50	0.50
Trasp. Est	[-]	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90
Opaco Ovest		0.90	0.90	0.90	0.50	0.90	0.50	0.90	0.90	0.90	0.90	0.50	0.90	0.50	0.90	0.50	0.90	0.90	0.50	0.50
Trasp. Ovest		0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90
Pavimento		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Soffitto		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Altezza [m]		12.30	12.30	12.30	12.30	12.30	12.30	12.30	12.30	15.30	15.30	15.30	15.30	15.30	15.30	15.30	15.30	15.30	15.30	15.30
Af (Sup. utile) [m2]		960.00	960.00	960.00	960.00	960.00	960.00	960.00	960.00	1200.00	1200.00	1200.00	1200.00	1200.00	1200.00	1200.00	850.00	850.00	850.00	850.00

Per quanto riguarda i dati meteorologici utilizzati per le simulazioni relative agli scenari di mitigazione, i valori della radiazione solare globale sono gli stessi adottati per gli scenari *baseline*. I valori della temperatura dell'aria, invece, sono ottenuti a partire da quelli utilizzati per gli scenari *baseline*, sommando a questi:

- per i mesi della stagione di riscaldamento, le differenze di temperatura dell'aria esterna calcolate con ENVI-met nei giorni tipici invernali, nelle zone del dominio di calcolo del modello ENVI-met in cui sono state applicate le tecnologie verdi;
- per i mesi di giugno, luglio, agosto e settembre, le differenze di temperatura dell'aria esterna calcolate con ENVI-met nei giorni tipici estivi, nelle zone del dominio di calcolo del modello ENVI-met in cui sono state applicate le tecnologie verdi.

Poiché, con l'eccezione degli scenari RM1 e RM2, le zone del dominio di calcolo in cui sono state applicate le tecnologie verdi non coincidono con l'intero dominio di calcolo del rispettivo modello ENVI-met, le variazioni della temperatura dell'aria utilizzate per le simulazioni energetiche non coincidono con quelle illustrate nei paragrafi §7.1.2, §7.1.3, §7.2.2, §7.2.3, §7.3.2 e §7.3.3. Le differenze di temperatura utilizzate per il calcolo della temperatura esterna delle simulazioni energetiche sono riportate nelle tabelle da Tabella 51 a Tabella 53.
In Tabella 54, infine, sono riassunte le condizioni meteo assunte per le simulazioni di ciascuno scenario.

Tabella 51. Differenze di temperatura esterna considerate per Torino

Ora	ΔT (TO1-Baseline_TO) [°C]		ΔT (TO2-Baseline_TO) [°C]		ΔT (TO3-Baseline_TO) [°C]	
	ΔT invernale	ΔT estivo	ΔT invernale	ΔT estivo	ΔT invernale	ΔT estivo
00.00	-0.056	-0.064	-0.059	-0.087	-0.132	-0.075
01.00	-0.138	-0.067	-0.151	-0.094	-0.178	-0.079
02.00	-0.128	-0.046	-0.139	-0.067	-0.176	-0.061
03.00	-0.108	-0.038	-0.118	-0.053	-0.153	-0.059
04.00	-0.124	-0.022	-0.135	-0.032	-0.164	-0.049
05.00	-0.066	-0.072	-0.071	-0.105	-0.127	-0.107
06.00	-0.126	-0.090	-0.137	-0.129	-0.170	-0.119
07.00	-0.132	-0.010	-0.142	-0.021	-0.177	-0.013
08.00	-0.083	-0.010	-0.089	-0.014	-0.141	0.066
09.00	-0.064	-0.032	-0.068	-0.039	-0.066	0.077
10.00	-0.084	-0.053	-0.088	-0.062	0.001	0.059
11.00	-0.030	-0.079	-0.029	-0.083	0.019	0.020
12.00	0.035	-0.036	0.036	-0.044	0.028	-0.003
13.00	0.146	-0.016	0.140	-0.038	0.004	-0.026
14.00	0.006	-0.058	0.008	-0.063	-0.029	-0.028
15.00	-0.066	-0.166	-0.055	-0.170	-0.067	-0.065
16.00	-0.086	-0.216	-0.078	-0.217	-0.109	-0.080
17.00	-0.106	-0.262	-0.107	-0.257	-0.157	-0.092
18.00	-0.102	-0.228	-0.111	-0.220	-0.165	-0.132
19.00	-0.099	-0.186	-0.110	-0.171	-0.154	-0.161
20.00	-0.104	-0.076	-0.118	-0.077	-0.158	-0.090
21.00	-0.100	-0.087	-0.114	-0.098	-0.156	-0.101
22.00	-0.083	-0.067	-0.097	-0.076	-0.145	-0.085
23.00	-0.064	-0.070	-0.076	-0.083	-0.120	-0.073

Tabella 52. Differenze di temperatura esterna considerate per Milano

Ora	ΔT (MI1-Baseline_MI) [°C]		ΔT (MI2-Baseline_MI) [°C]		ΔT (MI3-Baseline_MI) [°C]	
	ΔT invernale	ΔT estivo	ΔT invernale	ΔT estivo	ΔT invernale	ΔT estivo
00.00	-0.095	-0.002	-0.002	-0.037	0.017	-0.038
01.00	-0.094	0.000	-0.003	-0.019	0.016	-0.035
02.00	-0.105	0.000	-0.005	-0.020	0.020	-0.027
03.00	-0.098	0.000	-0.004	-0.020	0.018	-0.032
04.00	-0.096	0.001	-0.004	-0.018	0.017	-0.023
05.00	-0.096	0.000	-0.003	-0.020	0.016	-0.033
06.00	-0.097	-0.006	-0.003	-0.012	0.015	-0.017

07.00	-0.096	-0.004	-0.003	-0.014	0.015	-0.019
08.00	-0.095	-0.031	-0.003	-0.061	0.014	-0.064
09.00	-0.084	-0.006	0.004	-0.054	0.022	-0.124
10.00	-0.098	0.007	0.011	-0.049	0.033	-0.284
11.00	-0.104	0.011	-0.011	-0.005	0.006	-0.308
12.00	-0.509	0.020	-0.273	0.052	-0.256	-0.267
13.00	-0.480	0.021	-0.161	0.159	-0.139	-0.191
14.00	-0.323	0.010	-0.068	0.138	-0.041	-0.240
15.00	0.913	-0.002	1.124	0.056	1.182	-0.263
16.00	-0.505	0.006	-0.458	-0.148	-0.410	-0.332
17.00	0.106	0.007	0.185	-0.064	0.212	-0.153
18.00	0.771	0.005	0.918	-0.096	0.940	-0.195
19.00	-0.031	0.007	0.077	-0.110	0.103	-0.128
20.00	-0.128	0.000	-0.013	-0.090	0.007	-0.149
21.00	-0.121	-0.004	-0.010	-0.034	0.008	-0.083
22.00	-0.114	0.003	-0.009	-0.027	0.008	-0.059
23.00	-0.110	0.002	-0.008	-0.030	0.008	-0.068

Tabella 53. Differenze di temperatura esterna considerate per Roma

Ora	ΔT (RM1-Baseline_RM) [°C]		ΔT (RM2-Baseline_RM) [°C]		ΔT (RM3-Baseline_RM) [°C]	
	ΔT invernale	ΔT estivo	ΔT invernale	ΔT estivo	ΔT invernale	ΔT estivo
00.00	-0.030	-0.030	-0.290	-0.250	-0.092	-0.074
01.00	-0.030	-0.020	-0.350	-0.200	-0.103	-0.049
02.00	-0.030	-0.050	-0.330	-0.460	-0.107	-0.051
03.00	-0.020	-0.020	-0.310	-0.190	-0.097	-0.053
04.00	-0.020	-0.010	-0.300	-0.170	-0.092	-0.050
05.00	-0.010	-0.010	-0.260	-0.140	-0.083	-0.045
06.00	-0.020	0.000	-0.260	-0.080	-0.090	-0.029
07.00	-0.020	0.000	-0.260	-0.020	-0.082	0.002
08.00	0.010	-0.020	-0.130	-0.010	-0.051	0.024
09.00	0.010	-0.030	-0.060	-0.030	-0.021	0.028
10.00	0.010	-0.050	-0.020	-0.110	-0.004	0.030
11.00	0.010	-0.060	0.000	-0.200	0.016	-0.011
12.00	0.010	-0.070	0.020	-0.240	0.041	-0.014
13.00	-0.010	-0.080	-0.040	-0.290	0.047	-0.028
14.00	-0.020	-0.080	-0.110	-0.300	0.007	-0.019
15.00	-0.020	-0.080	-0.150	-0.330	-0.008	-0.026
16.00	-0.010	-0.070	-0.180	-0.290	-0.025	-0.074
17.00	-0.010	-0.050	-0.220	-0.280	-0.045	-0.045
18.00	-0.020	-0.050	-0.240	-0.290	-0.062	-0.060
19.00	-0.020	-0.040	-0.230	-0.260	-0.047	-0.051
20.00	0.150	-0.030	-0.100	-0.210	-0.060	-0.031
21.00	-0.010	-0.040	-0.220	-0.280	-0.058	-0.062
22.00	0.000	-0.030	-0.210	-0.230	-0.053	-0.054
23.00	0.000	-0.040	-0.170	-0.300	-0.040	-0.080

Tabella 54. Condizioni meteo adottate per ciascuno scenario

Scenario	Condizioni meteo
Baseline_TO1-2	Giorni medi mensili calcolati a partire dall'anno tipo climatico per Torino [35]
Baseline_TO3	Giorni medi mensili calcolati a partire dall'anno tipo climatico per Torino [35]
TO1-E	Giorni medi mensili calcolati a partire dall'anno tipo climatico per Torino [35], temperatura dell'aria modificata con i risultati dello scenario ENVI-met TO1, ΔT calcolata in via Beaulard
TO1-W	Giorni medi mensili calcolati a partire dall'anno tipo climatico per Torino [35], temperatura dell'aria modificata con i risultati dello scenario ENVI-met TO1, ΔT calcolata in via Beaulard
TO2-E	Giorni medi mensili calcolati a partire dall'anno tipo climatico per Torino [35], temperatura dell'aria modificata con i risultati dello scenario ENVI-met TO2, ΔT calcolata in via Beaulard

TO2-W	Giorni medi mensili calcolati a partire dall'anno tipo climatico per Torino [35], temperatura dell'aria modificata con i risultati dello scenario ENVI-met TO2, ΔT calcolata in via Beaulard
TO3-N	Giorni medi mensili calcolati a partire dall'anno tipo climatico per Torino [35], temperatura dell'aria modificata con i risultati dello scenario ENVI-met TO3, ΔT calcolata in via Lera
TO3-S	Giorni medi mensili calcolati a partire dall'anno tipo climatico per Torino [35], temperatura dell'aria modificata con i risultati dello scenario TO3, ΔT calcolata in via Lera
Baseline_MI	Giorni medi mensili calcolati a partire dall'anno tipo climatico per Milano [35]
MI1-E	Giorni medi mensili calcolati a partire dall'anno tipo climatico per Milano [35], temperatura dell'aria modificata con i risultati dello scenario ENVI-met MI1, ΔT calcolata in via Bellinzaghi
MI1-W	Giorni medi mensili calcolati a partire dall'anno tipo climatico per Milano [35], temperatura dell'aria modificata con i risultati dello scenario ENVI-met MI1, ΔT calcolata in via Bellinzaghi
MI2-E	Giorni medi mensili calcolati a partire dall'anno tipo climatico per Milano [35], temperatura dell'aria modificata con i risultati dello scenario ENVI-met MI2, ΔT calcolata in via Bassi
MI2-W	Giorni medi mensili calcolati a partire dall'anno tipo climatico per Milano [35], temperatura dell'aria modificata con i risultati dello scenario ENVI-met MI2, ΔT calcolata in via Bassi
MI3-E	Giorni medi mensili calcolati a partire dall'anno tipo climatico per Milano [35], temperatura dell'aria modificata con i risultati dello scenario ENVI-met MI3, ΔT calcolata in via Bassi
MI3-W	Giorni medi mensili calcolati a partire dall'anno tipo climatico per Milano [35], temperatura dell'aria modificata con i risultati dello scenario ENVI-met MI3, ΔT calcolata in via Bassi
Baseline_RM	Giorni medi mensili calcolati a partire dall'anno tipo climatico per Roma [35]
RM1	Giorni medi mensili calcolati a partire dall'anno tipo climatico per Roma [35], temperatura dell'aria modificata con i risultati dello scenario ENVI-met RM1, ΔT calcolata su tutto il dominio della simulazione ENVI-met
RM2	Giorni medi mensili calcolati a partire dall'anno tipo climatico per Roma [35], temperatura dell'aria modificata con i risultati dello scenario ENVI-met RM2, ΔT calcolata su tutto il dominio della simulazione ENVI-met
RM3	Giorni medi mensili calcolati a partire dall'anno tipo climatico per Roma [35], temperatura dell'aria modificata con i risultati dello scenario ENVI-met RM3, ΔT calcolata nell'intorno dell'edificio di applicazione della green façade

8.3 Risultati

In Tabella 55 e Tabella 56 sono presentati i risultati dei fabbisogni energetici relativi all'edificio rappresentativo di Torino, per il quale è stata valutata l'applicazione di un *living wall* e di una *green façade* in un *canyon* urbano parallelo alla direzione principale del vento, e di un *living wall* in un *canyon* urbano perpendicolare alla direzione principale del vento.

Relativamente all'energia utile, Tabella 55, è possibile osservare che l'applicazione di un *living wall* fornisce una riduzione del fabbisogno sia invernale sia estivo in entrambe le configurazioni di *canyon* urbano. L'applicazione della *green façade*, invece, rispetto alla *baseline* vede migliorare la prestazione energetica estiva e peggiorare la prestazione energetica invernale.

Nel caso di *canyon* urbano parallelo al vento (TO1-E, TO1-W), il fabbisogno invernale è ridotto di 0.41% indipendentemente dall'applicazione sulla faccia Est oppure Ovest dell'edificio; il fabbisogno estivo è maggiormente ridotto in caso di installazione sulla faccia Est (-15.40%) rispetto a quella sulla faccia Ovest (-14.98%). Il peso del fabbisogno invernale è tale che la riduzione del fabbisogno totale è pressoché costante (i.e. -0.58%) indipendentemente dalla faccia di applicazione.

Nel caso di *canyon* urbano perpendicolare al vento (TO3-N, TO3-S), si registra una riduzione di tutti i fabbisogni -invernale, estivo e totale – ma più contenuta rispetto al *canyon* parallelo. La riduzione del fabbisogno invernale varia da 0.10% a 0.11% nel caso di installazione sul lato Sud e Nord, rispettivamente, con l'incremento della trasmittanza che si rivela più efficace se applicato a Nord. Al contrario, l'effetto sul fabbisogno estivo è invece opposto, con una riduzione maggiore nel caso di *living wall* a Sud, i.e. -10.91%, rispetto che a Nord, i.e. -9.05%. Anche in questo caso, il peso del fabbisogno invernale è tale da ottenere una riduzione totale pressoché costante (i.e. -0.20%) indipendentemente dalla faccia di applicazione del *living wall*.

Nel caso di applicazione di una *green façade* in un *canyon* urbano parallelo al vento, (TO2-E, TO2-W), si osserva un aumento del fabbisogno di energia utile invernale, pari a 0.47%, indipendentemente dalla faccia di

applicazione. Tale risultato è spiegabile con la riduzione degli apporti solari gratuiti dovuti all'utilizzo di una specie vegetale sempreverde, che produce un effetto di schermatura solare anche in inverno. L'effetto di schermatura della *green façade* è invece responsabile della riduzione del fabbisogno estivo, il cui effetto è maggiore per un'applicazione a Est, i.e. -13.39%, rispetto ad un'applicazione ad Ovest, i.e. -13.05%. Il peso del fabbisogno invernale, però, è tale per cui il fabbisogno totale di energia utile, nel caso di applicazione di *green façade*, è maggiore di 0.31% rispetto all'edificio della *baseline*, indipendentemente dalla faccia su cui la *green façade* è applicata.
Considerando l'energia totale in ingresso ai generatori, Tabella 56, ed applicando quindi i rendimenti degli impianti ipotizzati (Tabella 40), il peso del fabbisogno estivo su quello totale diminuisce. Si ottiene in tal modo, per l'applicazione di un *living wall* in *canyon* urbano parallelo al vento, una riduzione del fabbisogno totale dello 0.45% rispetto alla *baseline*. Una *green façade* in *canyon* urbano parallelo al vento comporta un aumento del fabbisogno dell'energia totale in ingresso ai generatori compreso tra 0.43% e 0.44%. Infine, un *living wall* in *canyon* urbano perpendicolare al vento fornisce una riduzione del fabbisogno totale compreso tra 0.12% e 0.13% rispetto alla *baseline*. In Tabella 56 sono presentate anche le variazioni, per ciascun scenario e rispetto alla baseline, del gas naturale e dell'energia elettrica consumati dai generatori.
È possibile quindi affermare che le prestazioni migliori si ottengono con un *living wall* in un canyon parallelo alla direzione del vento rispetto ad un *canyon* perpendicolare al vento. Le installazioni ad Est e a Sud forniscono prestazioni estive moderatamente migliori rispetto, rispettivamente, all'Ovest e al Nord; mentre le prestazioni invernali e totali di fatto non risentono del lato del *canyon* su cui il *living wall* è installato. L'installazione di una *green façade* migliora le prestazioni estive, con l'installazione ad Est che si comporta meglio di quella ad Ovest, ma peggiora sia le prestazioni invernali sia quelle totali.

Tabella 55. Fabbisogno di energia utile - Torino

	Baseline_TO12	Baseline_TO3	TO1-E	TO1-W	TO2-E	TO2-W	TO3-N	TO3-S
Fabbisogno Invernale [kWh]	155'550	155'724	154'911	154'905	156'282	156'278	155'548	155'575
Fabbisogno Estivo [kWh]	1'807	1'450	1'529	1'537	1'566	1'572	1'319	1'292
Fabbisogno Totale [kWh]	157'357	157'174	156'440	156'441	157'848	157'849	156'867	156'866
Δ Fabbisogno Invernale [kWh]	-	-	-639	-645	732	728	-176	-149
Δ Fabbisogno Estivo [kWh]	-	-	-278	-271	-242	-236	-131	-158
Δ Fabbisogno Totale [kWh]	-	-	-917	-916	491	492	-307	-307
Δ% Fabbisogno Invernale [-]	-	-	-0.41%	-0.41%	0.47%	0.47%	-0.11%	-0.10%
Δ% Fabbisogno Estivo [-]	-	-	-15.40%	-14.98%	-13.39%	-13.05%	-9.05%	-10.91%
Δ% Fabbisogno Totale [-]	-	-	-0.58%	-0.58%	0.31%	0.31%	-0.20%	-0.20%

Tabella 56. Fabbisogno di energia totale in ingresso al generatore - Torino

	Baseline_TO12	Baseline_TO3	TO1-E	TO1-W	TO2-E	TO2-W	TO3-N	TO3-S
Fabbisogno Invernale [kWh]	163'948	164'131	163'275	163'268	164'720	164'715	163'946	163'974
Fabbisogno Estivo [kWh]	405	325	342	344	350	352	295	289

Fabbisogno Totale [kWh]	164'352	164'456	163'617	163'612	165'070	165'067	164'241	164'263
Δ Fabbisogno Invernale [kWh]	-	-	-673	-680	772	768	-185	-157
Δ Fabbisogno Estivo [kWh]	-	-	-62	-61	-54	-53	-29	-35
Δ Fabbisogno Totale [kWh]	-	-	-735	-740	718	715	-215	-193
Δ% Fabbisogno Invernale [-]	-	-	-0.41%	-0.41%	0.47%	0.47%	-0.11%	-0.10%
Δ% Fabbisogno Estivo [-]	-	-	-15.40%	-14.98%	-13.39%	-13.05%	-9.05%	-10.91%
Δ% Fabbisogno Totale [-]	-	-	-0.45%	-0.45%	0.44%	0.43%	-0.13%	-0.12%
Δ Fabbisogno Invernale [m^3]	-	-	-67.7	-68.4	77.7	77.2	-18.6	-15.8
Δ Fabbisogno Estivo [kWhe]	-	-	-62.3	-60.6	-54.2	-52.8	-29.4	-35.4

In Tabella 57 e Tabella 58 sono presentati i risultati dei fabbisogni energetici relativi all'edificio rappresentativo di Milano, per il quale è stata valutata l'applicazione di un *living wall* in due *canyon* urbani di due dimensioni diverse, e di un *living wall* nel *canyon* urbano di dimensioni maggiori associato all'installazione di un *green roof* non sull'edificio rappresentativo (in quanto dotato di tetto a falde) ma su un edificio adiacente.
Relativamente all'energia utile, Tabella 57, è possibile osservare che l'applicazione di un *living wall* fornisce una riduzione del fabbisogno sia invernale sia estivo in tutte le configurazioni di *canyon* urbano analizzate.
Nel caso di *canyon* urbano più stretto (MI1-E, MI1-W), il fabbisogno invernale è ridotto di 0.23% in caso di installazione a Ovest e di 0.19% in caso di installazione a Est; anche il fabbisogno estivo è maggiormente ridotto in caso di installazione sulla faccia Est (-2.29%) rispetto a quella sulla faccia Ovest (-1.01%). La riduzione del fabbisogno totale di energia utile è compresa tra 0.19% e 0.26% per un'installazione del *living wall*, rispettivamente, a Ovest e a Est.
Nel caso di *canyon* urbano parallelo al vento e di dimensioni maggiori (MI2-E, MI2-W), si registra una riduzione di tutti i fabbisogni, invernale, estivo e totale, maggiore rispetto al *canyon* di dimensioni inferiori. Tale differenza è essenzialmente dovuta alla variazione della temperatura dell'aria esterna dovuta alla strategia di mitigazione, quanto le caratteristiche termofisiche dell'edificio sono costanti in tutti gli scenari milanesi. La riduzione del fabbisogno invernale varia da 1.05% a 1.09% nel caso di installazione sul lato Est e Ovest, rispettivamente. L'effetto sul fabbisogno estivo è invece opposto, con una riduzione maggiore nel caso di living wall a Est, i.e. -4.10%, rispetto che a Ovest, i.e. -0.80%. La riduzione del fabbisogno totale di energia utile è compresa tra 1.08% e 1.15% per un'installazione del *living wall*, rispettivamente, a Ovest e a Est.
Nel caso di applicazione di un *living wall* in un *canyon* urbano parallelo alla direzione principale del vento, associato all'installazione di un *green roof* su un edificio adiacente, (MI3-E, MI3-W), si osserva un miglioramento delle prestazioni energetiche sia in inverno sia in estate rispetto agli altri scenari per l'edificio milanese. La riduzione del fabbisogno invernale varia da 1.21% a 1.25% nel caso di installazione sul lato Est ed Ovest, rispettivamente. Al contrario, l'effetto sul fabbisogno estivo è opposto, con una riduzione maggiore nel caso di *living wall* a Est, i.e. -10.95%, rispetto che a Ovest, i.e. -7.60%. La riduzione del fabbisogno totale di energia utile è compresa tra 1.46% e 1.53% per un'installazione del *living wall*, rispettivamente, a Ovest e a Est.
Considerando l'energia totale in ingresso ai generatori, Tabella 58, ed applicando quindi i rendimenti degli impianti ipotizzati, il peso del fabbisogno estivo su quello totale diminuisce. Si ottiene in tal modo, per l'applicazione di un *living wall* in *canyon* urbano di dimensioni minori, una riduzione del fabbisogno totale compresa tra 0.20% e 0.22%. Un *living wall* in *canyon* urbano di dimensioni maggiori comporta una diminuzione del fabbisogno dell'energia totale in ingresso ai generatori compreso tra 1.07% e 1.09%. Infine, un *living wall* in *canyon* urbano associato all'installazione di un *green roof* su un edificio adiacente, fornisce una riduzione del

fabbisogno totale compreso tra 1.28% e 1.30%. In Tabella 58 sono presentate anche le variazioni del gas naturale e dell'energia elettrica consumati dai generatori.
È possibile affermare che le prestazioni migliori si ottengono con un *living wall* in un *canyon* urbano di dimensioni maggiori e associato alla presenza di un *green roof* in un edificio contiguo. In assenza di un *green roof* adiacente, le prestazioni, pur rimanendo sempre migliori della *baseline*, si riducono e un *living wall* in un *canyon* urbano di dimensioni maggiori che si comporta meglio rispetto a quando è installato in un *canyon* di dimensioni minori. L'installazione ad Est fornisce prestazioni sia estive sia totali migliori rispetto all'Ovest; mentre per le prestazioni invernali un'installazione a Ovest è moderatamente più vantaggiosa.

Tabella 57. Fabbisogno di energia utile - Milano

	Baseline_MI	MI1-E	MI1-W	MI2-E	MI2-W	MI3-E	MI3-W
Fabbisogno Invernale [kWh]	168'511	168'193	168'125	166'745	166'676	166'465	166'397
Fabbisogno Estivo [kWh]	5'606	5'477	5'662	5'376	5'561	4'992	5'180
Fabbisogno Totale [kWh]	174'116	173'671	173'788	172'120	172'237	171'457	171'577
Δ Fabbisogno Invernale [kWh]	-	-318	-386	-1'766	-1'834	-2'046	-2'114
Δ Fabbisogno Estivo [kWh]	-	-128	57	-230	-45	-614	-426
Δ Fabbisogno Totale [kWh]	-	-446	-329	-1'996	-1'879	-2'660	-2'540
Δ% Fabbisogno Invernale [-]	-	-0.19%	-0.23%	-1.05%	-1.09%	-1.21%	-1.25%
Δ% Fabbisogno Estivo [-]	-	-2.29%	1.01%	-4.10%	-0.80%	-10.95%	-7.60%
Δ% Fabbisogno Totale [-]	-	-0.26%	-0.19%	-1.15%	-1.08%	-1.53%	-1.46%

Tabella 58. Fabbisogno di energia totale in ingresso al generatore - Milano

	Baseline_MI	MI1-E	MI1-W	MI2-E	MI2-W	MI3-E	MI3-W
Fabbisogno Invernale [kWh]	177'608	177'274	177'202	175'747	175'675	175'452	175'381
Fabbisogno Estivo [kWh]	1'255	1'226	1'267	1'203	1'245	1'117	1'159
Fabbisogno Totale [kWh]	178'863	178'500	178'469	176'950	176'920	176'570	176'540
Δ Fabbisogno Invernale [kWh]	-	-335	-406	-1'861	-1'933	-2'156	-2'228
Δ Fabbisogno Estivo [kWh]	-	-29	13	-51	-10	-137	-95
Δ Fabbisogno Totale [kWh]	-	-363	-394	-1'913	-1'943	-2'293	-2'323
Δ% Fabbisogno Invernale [-]	-	-0.19%	-0.23%	-1.05%	-1.09%	-1.21%	-1.25%
Δ% Fabbisogno Estivo [-]	-	-2.29%	1.01%	-4.10%	-0.80%	-10.95%	-7.60%
Δ% Fabbisogno Totale [-]	-	-0.20%	-0.22%	-1.07%	-1.09%	-1.28%	-1.30%

Δ Fabbisogno Invernale [m³]	-	-33.7	-40.9	-187.3	-194.5	-216.9	-224.1
Δ Fabbisogno Estivo [kWhe]	-	-28.7	12.7	-51.4	-10.0	-137.4	-95.3

In Tabella 59 e Tabella 60 sono presentati i risultati dei fabbisogni energetici relativi all'edificio rappresentativo di Roma, per il quale è stata valutata l'applicazione di un *green roof* in un contesto di applicazione all'intera zona cittadina considerata, di un *green roof* e di una *green façade* in un contesto di installazione estensiva degli stessi, e di una *green façade* su un solo edificio.

Relativamente all'energia utile, Tabella 59, è possibile osservare che l'applicazione di un *green roof* (RM1), in un contesto di installazione estensiva, fornisce i risultati migliori tra quelli indagati con gli scenari per l'edificio di Roma. Si osserva infatti una riduzione del fabbisogno sia invernale sia estivo. Il fabbisogno invernale è ridotto di 0.91% ed il fabbisogno estivo è ridotto del 7.00%. La riduzione del fabbisogno totale di energia utile è pari a 1.48%.

Nel caso di installazione estensiva sia di *green roof* sia di *green façade*, (RM2), si osserva un peggioramento della prestazione energetica invernale rispetto alla *baseline*, legata essenzialmente alla riduzione di apporti gratuiti per l'adozione di una specie vegetale sempreverde ed alla riduzione della temperatura dell'aria, con un fabbisogno invernale maggiore del 1.13%. La prestazione estiva è invece migliore sia della *baseline* sia dello scenario con il solo *green roof*, e comporta una riduzione del fabbisogno estivo pari a 14.52%. Il fabbisogno totale di energia utile è inferiore di 0.34% rispetto alla *baseline*: la prestazione totale è quindi positiva ma peggiore dello scenario con l'applicazione estensiva del solo tetto verde.

Nel caso di installazione di una *green façade* su un edificio singolo, (RM3), si osserva un miglioramento della prestazione estiva rispetto alla *baseline*: una riduzione del 2.84% che però è più contenuta rispetto agli altri due scenari. La prestazione invernale e quella totale sono invece peggiori rispetto alla *baseline* con un aumento, rispettivamente, dello 0.65% e dello 0.32%.

Considerando l'energia totale in ingresso ai generatori, Tabella 60, ed applicando quindi i rendimenti degli impianti ipotizzati, il peso del fabbisogno estivo su quello totale diminuisce. Si ottiene in tal modo, per l'applicazione estensiva di *green roof*, una riduzione del fabbisogno totale pari a 1.04%. Per l'applicazione estensiva sia di *green roof* sia di *green façade*, l'efficienza del sistema di raffrescamento porta a ridurre il peso del miglioramento estivo rispetto alla prestazione energetica totale, che vede prevalere l'influenza del peggioramento in condizioni invernali, con un aumento del fabbisogno totale pari a 0.79%. Infine, tale comportamento è presente anche nel caso di applicazione di una *green façade* su un edificio singolo, con un aumento del fabbisogno di energia totale in ingresso ai generatori pari a 0.57%. In Tabella 58 sono presentate anche le variazioni del gas naturale e dell'energia elettrica consumati dai generatori.

È possibile affermare che, termini di energia utile, le prestazioni migliori si ottengono con l'applicazione estensiva di *green roof*, e che l'applicazione estensiva contemporanea di *green roof* e di *green façade* comporta comunque una riduzione dell'energia totale. L'applicazione di una *green façade* su un edificio singolo vede invece aumentare il fabbisogno di energia utile totale. La situazione si modifica invece in termini di energia in ingresso ai generatori. In tal caso l'applicazione estensiva dei *green roof* comporta una riduzione dell'energia totale, ma la presenza di *green façade*, sia su edificio singolo sia associata in modo estensivo ai *green roof*, comporta degli svantaggi invernali che non riescono ad essere compensati dai vantaggi estivi. Un possibile sviluppo futuro dell'attività oggetto del presente report può essere l'estensione della ricerca a specie vegetali caducifoglie, che limitino la riduzione degli apporti gratuiti durante la stagione di riscaldamento.

Per tutte le valutazioni energetiche effettuate occorre infine sottolineare che il metodo di calcolo utilizzato, basato sulla norma UNI EN ISO 13790, paga la facilità e la velocità di utilizzo con una riduzione della precisione nel calcolo dei fabbisogni di raffrescamento, e tale limitazione può aver portato ad una sottostima dell'effetto degli scenari di mitigazione sia sul fabbisogno estivo sia sul fabbisogno totale. Un possibile sviluppo futuro dell'attività oggetto del presente report può essere l'utilizzo di metodi di calcolo più precisi relativamente ai fabbisogni di raffrescamento.

Tabella 59. Fabbisogno di energia utile - Roma

	Baseline_RM	RM1	RM2	RM3
Fabbisogno Invernale [kWh]	97'078	96'197	98'175	97'709
Fabbisogno Estivo [kWh]	10'058	9'354	8'597	9'772
Fabbisogno Totale [kWh]	107'136	105'552	106'772	107'481
Δ Fabbisogno Invernale [kWh]	-	-881	1'097	631
Δ Fabbisogno Estivo [kWh]	-	-704	-1'461	-286
Δ Fabbisogno Totale [kWh]	-	-1'585	-364	345
Δ% Fabbisogno Invernale [-]	-	-0.91%	1.13%	0.65%
Δ% Fabbisogno Estivo [-]	-	-7.00%	-14.52%	-2.84%
Δ% Fabbisogno Totale [-]	-	-1.48%	-0.34%	0.32%

Tabella 60. Fabbisogno di energia totale in ingresso al generatore - Roma

	Baseline_RM	RM1	RM2	RM3
Fabbisogno Invernale [kWh]	102'319	101'391	103'475	102'985
Fabbisogno Estivo [kWh]	2'251	2'094	1'924	2'187
Fabbisogno Totale [kWh]	104'571	103'485	105'399	105'172
Δ Fabbisogno Invernale [kWh]	-	-928	1'156	665
Δ Fabbisogno Estivo [kWh]	-	-158	-327	-64
Δ Fabbisogno Totale [kWh]	-	-1'086	829	601
Δ% Fabbisogno Invernale [-]	-	-0.91%	1.13%	0.65%
Δ% Fabbisogno Estivo [-]	-	-7.00%	-14.52%	-2.84%
Δ% Fabbisogno Totale [-]	-	-1.04%	0.79%	0.57%
Δ Fabbisogno Invernale [m³]	-	-93.4	116.3	66.9
Δ Fabbisogno Estivo [kWhe]	-	-157.5	-326.9	-64.0

9 Sviluppo di una metodologia LCA per la caratterizzazione dell'applicazione di strategie di mitigazione della UHI

Gli studi LCA possono essere condotti applicando metodi di Life Cycle Impact Assement (LCIA) diversi. Gli standard ISO 14040 e 14044: 2006 [37], [38] non specificano quale metodo LCIA debba essere utilizzato, pertanto la scelta ricade sull'utilizzatore della metodologia stessa.
Tra i vari metodi LCIA esistenti, il ReCiPe è stato aggiornato nel 2016, pertanto è tra i più aggiornati. In ReCiPe sono stati sviluppati modelli di caratterizzazione per il calcolo dei fattori di caratterizzazione "*midpoint*" ed "endpoint" e per il conseguente calcolo degli impatti e dei danni [39]. Nella sua ultima versione (i.e., 2016) il metodo ReCiPe è stato implementato:

1. Fornendo fattori di caratterizzazione rappresentativi per la scala globale e mantenendo la possibilità per molte categorie di impatto di implementare i fattori di caratterizzazione relativi alla scala nazionale;
2. Migliorando i modelli di caratterizzazione al fine di determinare fattori di caratterizzazione "*midpoint*" ed "*endpoint*" [40].

Proprio la possibilità di implementare fattori di caratterizzazione locali/regionali ha fatto in modo che la scelta del metodo da usare per il seguito del presente studio ricadesse sul metodo ReCiPe.

9.1 Il metodo ReCiPe2016

Il metodo ReCiPe per il Life Cycle Impact Assessment (LCIA) è stato sviluppato nel 2008 per la valutazione degli impatti potenziali nel contesto europeo. Il metodo ReCiPe2016 è stato poi modificato riferendo gli impatti al contesto globale. Inoltre, il metodo ReCiPe2016 offre la possibilità di implementare, per alcune categorie di impatto, fattori di caratterizzazione per il calcolo di impatti a scala nazionale o continentale [41]. L'obiettivo principale del metodo ReCiPe è quello di trasformare i dati di *input* del Life Cycle Inventory (LCI) in 18 indicatori *midpoint* e tre indicatori *endpoint* [41].

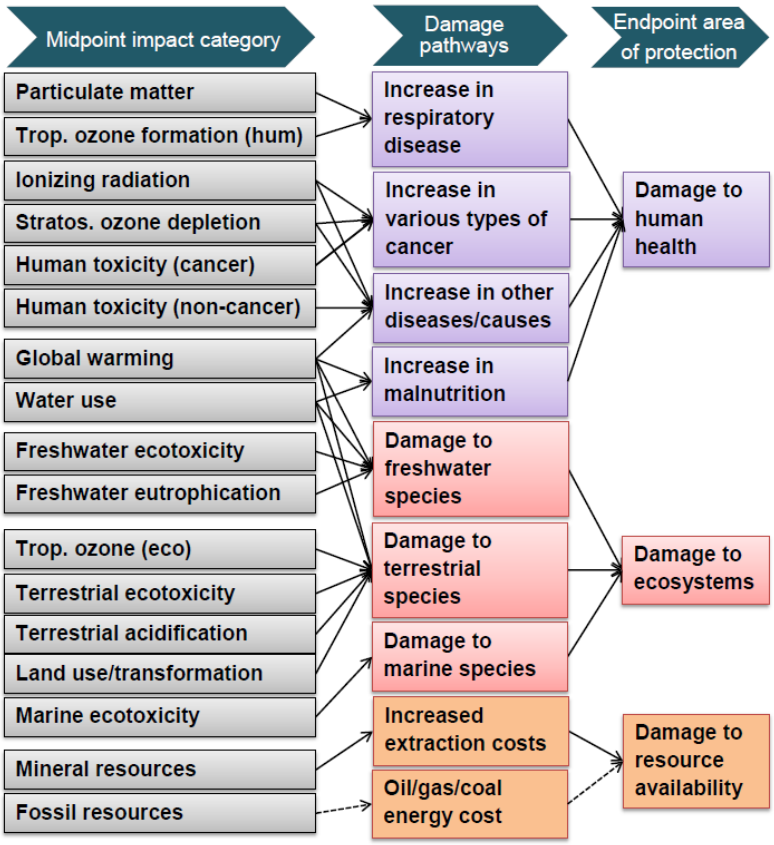


Figura 165. Categorie di impatto *midpoint* e di danno *endpoint* del metodo ReCiPe2016. Fonte: [41]

Ogni metodo (i.e., *midpoint* ed *endpoint*) contiene fattori di caratterizzazione per tre prospettive culturali:
- individualista, ovvero una prospettiva a breve termine (i.e., *short-term*) ottimista circa il fatto che la tecnologia possa evitare danni nel futuro;
- gerarchica. Si tratta di un modello che ha riscosso un consenso generale, e per questo viene considerato un modello da usare di *default*;
- egalitaria, ovvero un modello con valutazioni a lungo termine basato sul principio precauzionario.

Le classi di danno sono: danno alla salute umana, danno agli ecosistemi e danno alla disponibilità di risorse. Gli indicatori e le unità per ciascuna classe di danno sono riportati in Tabella 61.

Tabella 61. Indicatori e unità per le classi di danno *endpoint*

Classe di danno	Indicatore	Unità
Salute umana	Disability adjusted loss of life years	Years
Ecosistemi	Time-integrated species loss	Species*year
Disponibilità di risorse	Surplus cost	Dollar

Ad oggi, il metodo ReCiPe2016 è il metodo di LCIA maggiormente utilizzato [41]–[43], pertanto si è pensato di implementare tale metodo per l'applicazione all'ambiente costruito considerando gli impatti sulla scala locale derivanti dall'interazione edificio-clima urbano.

9.2 Sviluppo di fattori di caratterizzazione per la valutazione dell'applicazione di scenari di mitigazione della UHI basati sull'applicazione di singole tecnologie verdi d'involucro

Per lo sviluppo di una metodologia LCA in grado di includere la valutazione degli effetti della mitigazione dell'isola di calore urbana ci si è focalizzati sulla variazione di temperatura dell'aria. Infatti, le analisi riportate nelle sezioni

precedenti hanno mostrato che l'applicazione delle strategie di mitigazione basate sull'installazione di tetti e pareti verdi non hanno effetti significativi sulla concentrazione di CO_2 dell'aria e invece possono, a seconda dello scenario di mitigazione applicato, contribuire alla mitigazione delle temperature urbane.
Di seguito, in Figura 166, è stato mostrato come i fattori di caratterizzazione possano essere applicati ad uno o all'altro dei due approcci sviluppati durante la prima annualità del PTR 2019-2021.

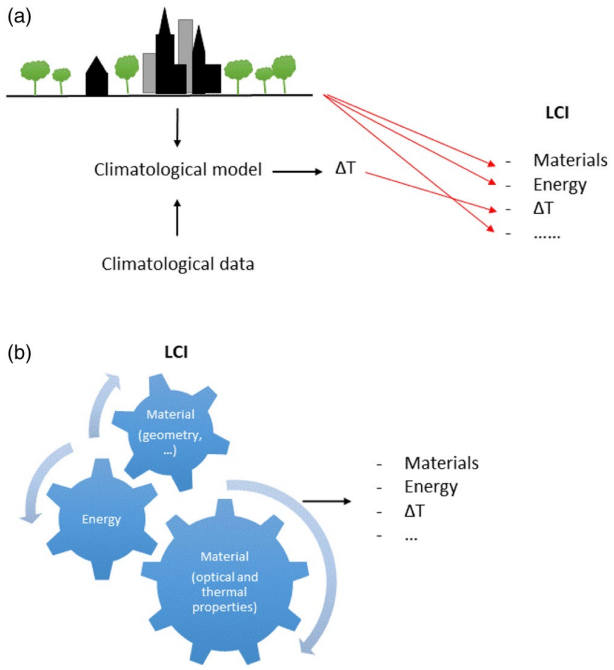


Figura 166. Approcci per l'inclusione della mitigazione dell'isola di calore urbana nella metodologia LCA

In particolare, per l'approccio A è stato scelto il caso di studio di un'area urbana alla quale viene applicata una strategia di mitigazione che prevede l'installazione sia di facciate verdi sia di tetti verdi estensivi (Sezione 10.1). Per l'approccio B è stato scelto il caso di studio di un'area urbana alla quale vengono applicati tetti verdi estensivi (Sezione 10.1).

9.2.1 Fattori di caratterizzazione *midpoint*

Il fattore di caratterizzazione *midpoint* scelto per la variazione di temperatura locale è il "Local Warming Potential", ovvero la variazione di temperatura locale che può coincidere con la mitigazione dell'isola di calore urbana o con l'insorgenza della stessa. Il fattore di caratterizzazione *midpoint* esprime la variazione di temperatura locale e, diversamente da quanto succede per il fattore di caratterizzazione "Global Warming Potential", non si ottiene traducendo l'effetto dei gas serra in termini di kilogrammi di biossido di carbonio equivalenti, ma fa riferimento a dei meccanismi diversi. Infatti, clima, struttura dell'area urbanizzata, vegetazione e materiali possono interagire secondo meccanismi complessi e dare origine a variazioni locali di temperatura. Ad oggi non è stata trovata un'unica relazione sintetica in modo da esprimere come la variazione dei molteplici fattori urbani possa influire sulla variazione locale di temperatura. Alcuni sforzi sono stati tuttavia condotti in tal senso (e.g., [44], [45]), ma tali sforzi vanno maggiormente nella direzione di predire la magnitudo dell'isola di calore urbana. Non ci sono studi che però possano predire in modo semplice e non semplicistico la mitigazione della stessa. Pertanto, ogni qualvolta si debba valutare *ex-ante* la bontà di un piano urbano di mitigazione della UHI, si deve ricorrere a modelli climatologici. Questi sono spesso strumenti complessi che richiedono competenze tecniche specifiche, necessitano di un grande numero di dati di *input* e richiedono un tempo computazionale anche molto lungo. Di seguito sono riportati due approcci per il calcolo della variazione di temperatura locale. Tali approcci sostituiscono lo sviluppo di fattori di caratterizzazione. Il primo approccio (i.e., Approccio A) si basa sull'utilizzo di modelli di simulazione, per la precisione ENVI-met. Mentre, il secondo è un

approccio sintetico che, mediante lo sviluppo di una relazione matematica, predice, in tempi brevi e senza la necessità di particolare *expertise*, la variazione di temperatura locale relativa all'applicazione di scenari di mitigazione della UHI basati su di una singola tecnologia verde d'involucro.
Il metodo ReCiPe2016 consente di scegliere il valore, ovvero l'orizzonte temporale degli effetti delle categorie *midpoint* di impatto. Questa possibilità di scelta è principalmente dovuta al fatto che i diversi gas clima alteranti hanno diversi tempi di residenza e pertanto possono influenzare la categoria di impatto *midpoint*. Inoltre, le scelte di valore riflettono i potenziali adattamenti della società ai fattori di stress (e.g., cambiamenti climatici). Per quel che riguarda la categoria di impatto "Local Warming Potential", il valore di scelta sarà lo stesso per tutte le prospettive (i.e., individualista, gerarchica ed egalitaria) perché la metrica utilizzata sarà la temperatura o la variazione della stessa.

9.2.1.1 Approccio A

Nel caso dell'uso dell'approccio A, sono stati utilizzati gli *output* delle simulazioni fatte col *software* ENVI-met descritti in Sezione 7. La variazione della temperatura locale o della UHI confluisce in una categoria d'impatto *midpoint* costruita *ad hoc*, ovvero "Local Warming Potential" (Figura 167).

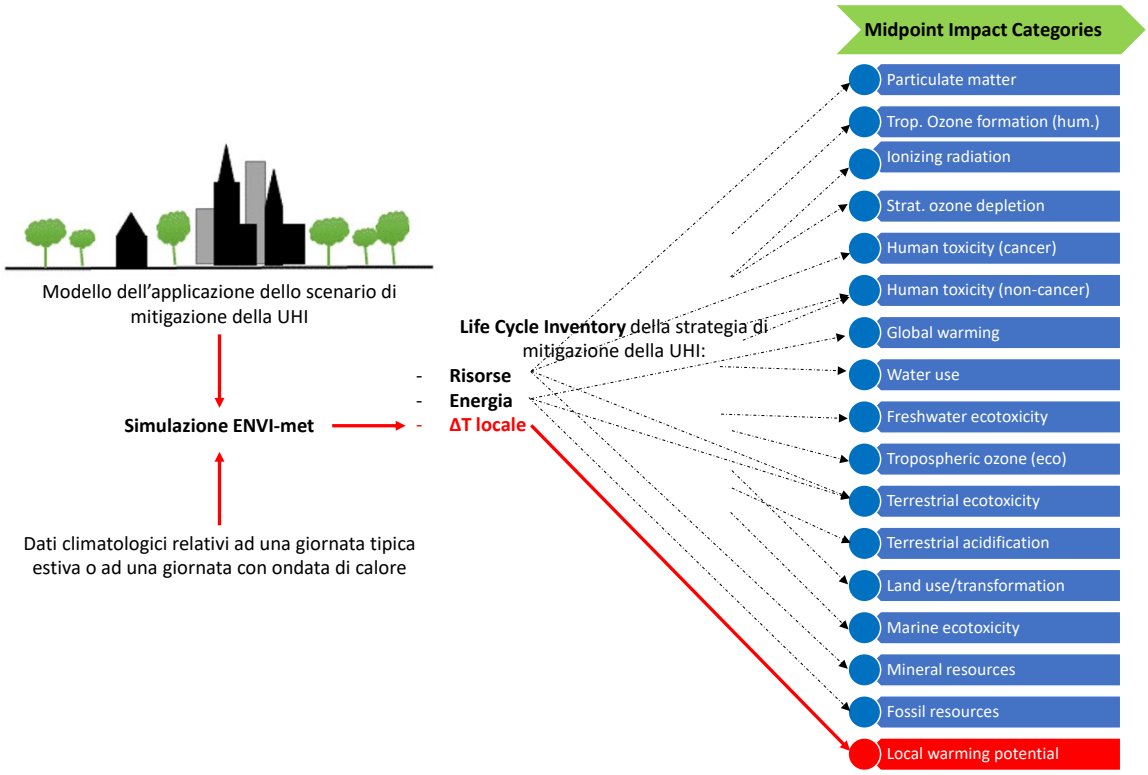


Figura 167. Sviluppo di un modello di caratterizzazione *midpoint* per l'applicazione di strategie di mitigazione dell'UHI. Approccio A e metodo ReCiPe2016

In particolare, sono stati utilizzate le variazioni medie di temperatura in corrispondenza dell'applicazione degli scenari di mitigazione RM1 e RM2.

9.2.1.2 Approccio B: sviluppo di un fattore di caratterizzazione *midpoint* relativo all'applicazione singola di strategie di mitigazione basate sull'applicazione di facciate verdi

Per quel che riguarda l'approccio B, è stata sviluppata una metodologia apposita che si basa sull'utilizzo dei Processi Analitici Gerarchici (Analytic Hierarchy Processes - metodo AHP), ovvero, una particolare analisi multicriteri.

Il fine dell'uso di tale metodologia è quello di sviluppare relazioni matematiche sintetiche in grado di restituire, al variare di alcuni parametri urbani significativi, l'indice di mitigazione dell'isola di calore urbana all'altezza dei pedoni a seconda dell'applicazione di singole strategie verdi di mitigazione d'involucro. In particolare, tale metodologia è stata sviluppata per l'applicazione alla zona climatica Csa e ad aree urbane con una densità urbana (i.e., rapporto tra impronta degli edifici e area urbana) compresa tra 0.33 e 0.37.
Il problema della ricerca delle succitate relazioni matematiche è stato affrontato come schematizzato in Figura 168.

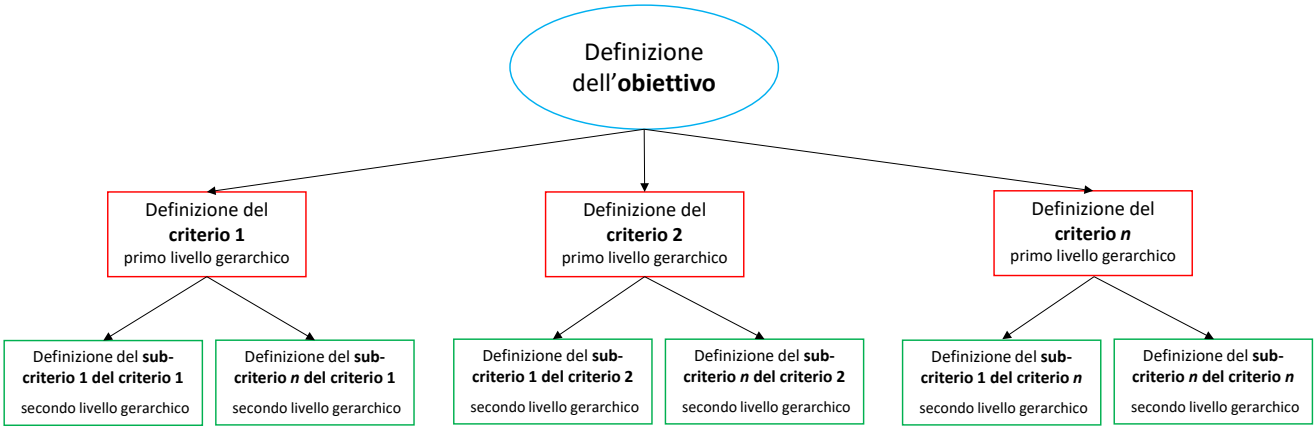


Figura 168. Schematizzazione del metodo AHP

Ovvero, prima di tutto si è definito l'obiettivo, poi sono stati definiti i criteri (i.e., primo livello gerarchico) e, infine, sono stati definiti i sub-criteri (i.e., secondo livello gerarchico). Nello specifico, per ciascuna strategia di mitigazione di involucro verde, si sono definiti obiettivi, criteri e sub-criteri come in Figura 169.

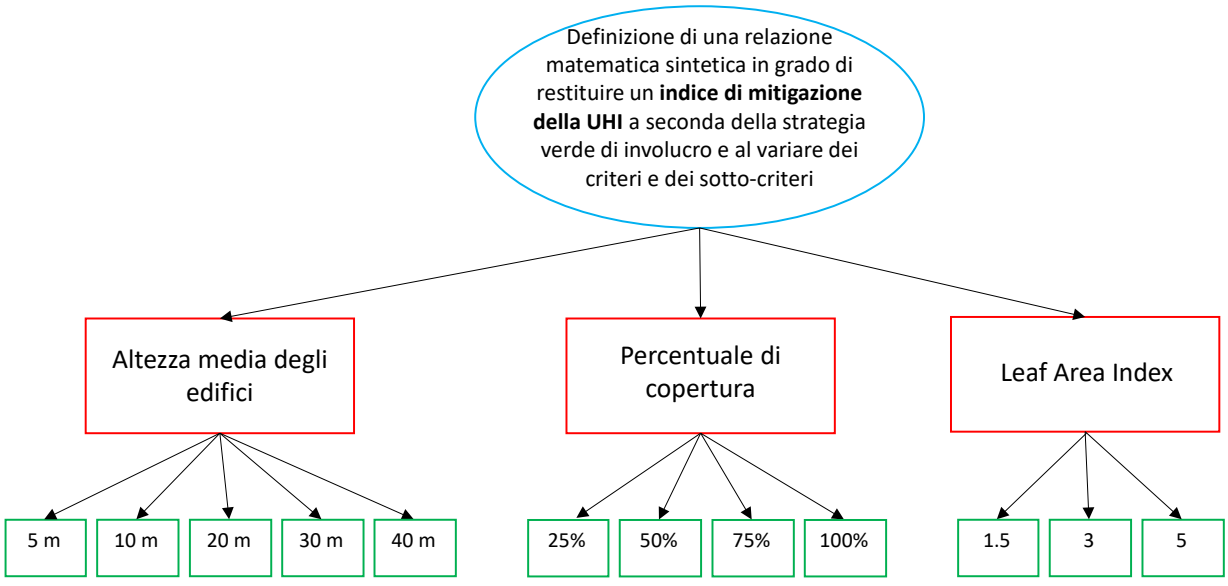


Figura 169. Definizione dell'obiettivo, dei criteri e dei sub-criteri definiti nel presente studio

Per poter raggiungere l'obiettivo, ovvero la definizione dell'indice di mitigazione della UHI, si è proceduto a individuare i pesi relativi ai sub-criteri, in modo da individuare quali sub-criteri hanno più o meno importanza rispetto agli altri nel mitigare l'isola di calore urbana e in che misura una o l'altra classe di intensità contribuisca alla mitigazione dell'isola di calore. Inoltre, dato che i sub-criteri confluiscono nei criteri (i.e., primo livello

gerarchico) anche per questi dovrà essere valutata l'importanza degli uni rispetto agli altri. Di seguito sono stati riportati i nomi dei pesi attribuiti a ciascuna classe di intensità (Figura 170).

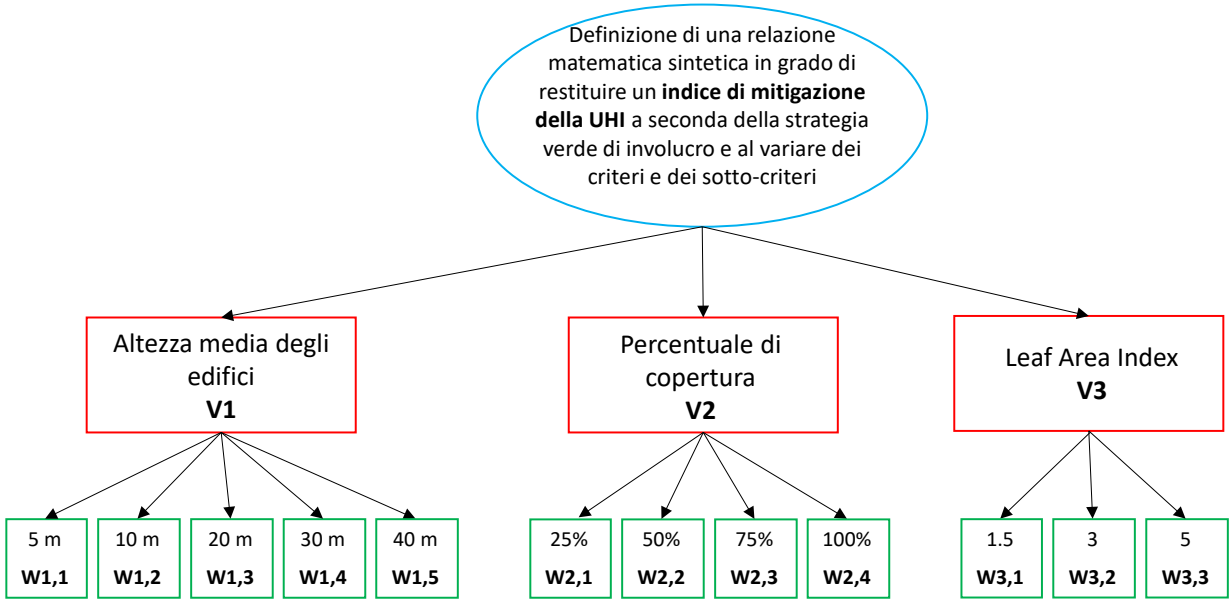


Figura 170. Indicazione dei nomi dei pesi per ciascuno criterio e sub-criterio

Per fare ciò, si è proceduto ad un'analisi multicriteri che è stata condotta a valle della realizzazione di 163 modelli ENVI-met che hanno simulato l'installazione di scenari di mitigazione dell'isola di calore urbana mediante l'applicazione di strategie verdi di involucro singole (i.e., o solo tetti verdi o solo pareti verdi). Tali scenari sono riferiti a tre aree urbane di tre città diverse (i.e., Roma, Bari e Firenze) appartenenti all'area climatica Csa e con densità urbana che varia da 0.33 a 0.37. Per ciascuna area di studio sono stati sviluppati i seguenti scenari:

- 16 scenari di copertura, ovvero quattro per ciascuna soluzione verde d'involucro (i.e., tetto verde estensivo, tetto verde intensivo, facciata verde e *living wall)*;
- otto scenari per i differenti LAI, ovvero due scenari per ciascuna soluzione verde;
- cinque scenari di controllo per le cinque classi di altezza;
- 20 scenari di altezza, ovvero cinque per ciascuna soluzione verde;
- un totale di 13 scenari di validazione degli indici sintetici.

Per l'analisi multicriteri sono state organizzate 12 matrici di giudizio in cui sono stati riportati i confronti a coppie, così suddivise:

- quattro matrici di confronto delle altezze, ovvero una per ciascuna soluzione verde;
- quattro matrici di confronto della copertura, ovvero una per ciascuna soluzione verde;
- quattro matrici di confronto del LAI, ovvero una per ciascuna soluzione verde.

Le matrici sono state popolate con i valori dei confronti a coppie relativi alla magnitudo della mitigazione della UHI. Successivamente, per ciascuna matrice sono stati calcolati gli autovalori. Questi ultimi sono stati poi normalizzati rispetto al valore unitario. Tali valori rappresentano i pesi delle classi di intensità. Di seguito è riportato l'esempio di una delle matrici sviluppate per l'installazione di facciate verdi e il calcolo degli autovalori.

Tabella 62. Matrice di giudizio relativa alla riduzione della temperatura urbana media da parte di facciate verdi a seconda dell'altezza (H). La colonna $w_{1,j}$ del peso delle classi di intensità mostra i valori dell'autovettore principale della matrice

ΔTmedia	Scenari						CR	$w_{1,j}$
		GF H05	GF H10	GF H20	GF H30	GF H40		
-0.12142	**GF H05**	1.0	0.7	0.6	0.5	0.5	0.002	0.51
-0.16733	**GF H10**	1.4	1.0	0.8	0.7	0.7		0.71
-0.21981	**GF H20**	1.8	1.3	1.0	0.9	0.9		0.93
-0.23365	**GF H30**	1.9	1.4	1.1	1.0	1.0		0.99

-0.23627	**GF H40**	1.9	1.4	1.1	1.0	1.0		1.00

I valori dell'autovettore, così trovati, sono stati utilizzati per il calcolo dell'indice sintetico così calcolato:

$$I_{GF}^{Mit} = v_1 * w_{1,j} + v_2 * w_{2,j} + v_3 * w_{3,j}$$

Dove I_{GF}^{Mit} è l'indice di mitigazione relativo all'applicazione delle facciate verdi, v_i sono i pesi dei criteri e $w_{i,j}$ sono i pesi dei sotto-criteri. In particolare, i pesi delle classi di intensità sono riportati di seguito.

Tabella 63. Pesi e classi di intensità dei criteri e sotto-criteri utilizzati

Criterio	Pesi (v_i)	Classe di intensità	Peso della classe di intensità ($w_{i,j}$)
Altezza	v_1	Altezza 5 m	$w_{1,1}$
		Altezza 10 m	$w_{1,2}$
		Altezza 20 m	$w_{1,3}$
		Altezza 30 m	$w_{1,4}$
		Altezza 40 m	$w_{1,5}$
Copertura	v_2	Copertura 25%	$w_{2,1}$
		Copertura 50%	$w_{2,2}$
		Copertura 75%	$w_{2,3}$
		Copertura 100%	$w_{2,4}$
LAI	v_3	LAI 1.5	$w_{3,1}$
		LAI 3	$w_{3,2}$
		LAI 5	$w_{3,3}$

Per la calibrazione del modello si è impostato che la distanza tra i valori trovati mediante la relazione matematica sintetica e i valori di mitigazione trovati mediante l'utilizzo del software ENVI-met siano minimizzati e che i pesi dei criteri siano non nulli. Per questo si è impostata la seguente funzione obiettivo:

$$F(v) = \sum_{i=1}^{n} (\Delta T_{GF} - I_{GF}^{Mit})^2$$

Con le seguenti condizioni:

$$\min F(v)$$
$$v_i > 0.01 \; con \; i = 1, 2, 3$$

In questo modo sono stati trovati i valori di I_{GF}^{Mit} e v_i.
Al fine di validare i risultati ottenuti e di testarne la stabilità è stato condotto un test *Jackknife*, ovvero un test statistico che mostra come variano le soluzioni del problema eliminando, uno alla volta, i dati di calibrazione del modello stesso. Infine, sono stati calcolati il MAE e il RMSE dei dati calcolati per la validazione del modello matematico con i dati di mitigazione della UHI ottenuti dalle simulazioni ENVI-met.
Di seguito sono stati riportati i pesi relativi alle classi di intensità relativi ai criteri di altezza media degli edifici (Figura 171), copertura percentuale delle facciate (Figura 172) e LAI.

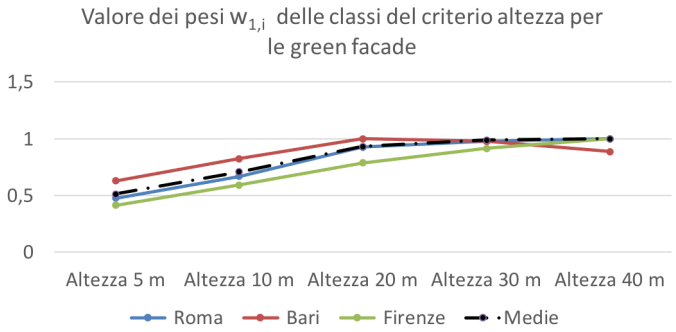


Figura 171. Pesi relativi al criterio "altezza" media degli edifici

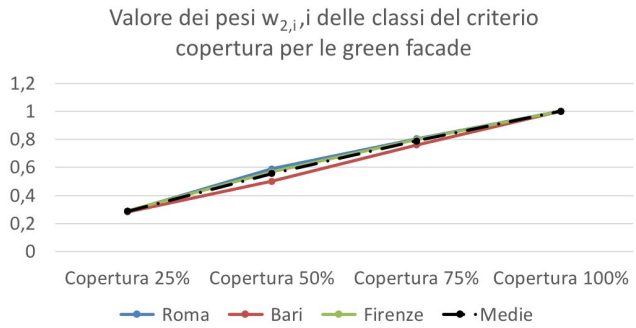


Figura 172. Pesi relativi al criterio "copertura" percentuale delle facciate verdi

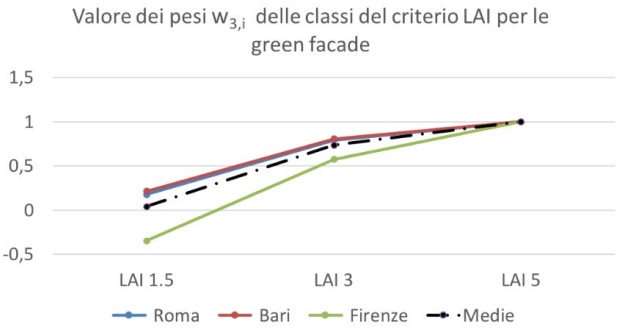


Figura 173. Pesi relativi al criterio "LAI" delle facciate verdi

Dalle figure relative ai pesi delle classi di intensità dei criteri, è possibile notare come per altezze degli edifici maggiori di 30 m si abbia l'effetto *plateau* (Figura 171); ovvero, aumentando l'altezza degli edifici, al di sopra dei 30 m la facciata verde non è in grado di apportare ulteriori benefici termici di mitigazione della UHI rispetto a quelli apportati fino ad un'altezza di 30 m. Inoltre, si può notare come vi sia un aumento lineare dei pesi relativi all'altezza fino a 20 m e come da 20 a 30 m tale aumento sia inferiore.
Per quel che riguarda la copertura percentuale delle facciate degli edifici (Figura 172), è possibile notare come il peso del criterio aumenti linearmente con l'aumentare della copertura percentuale.
Infine, Figura 173 mostra la variazione del peso per le classi di intensità relative al criterio "LAI". È possibile notare come il peso del LAI aumenti in modo significativo da 1.5 a 3, mentre tale aumento tende a ridursi passando da LAI 3 a LAI 5.
Dalla fase di calibrazione e validazione del modello, si ottiene la seguente relazione matematica sintetica, in grado di esprimere l'indice di mitigazione associato all'installazione di pareti verdi in area climatica mediterranea (i.e., Csa) e in area urbana con densità urbana compresa tra 0.33 e 0.37.

$$I_{GF}^{Mit} = 0.139 * w_{1,j} + 0.0061 * w_{2,j} + 0.01 * w_{3,j}$$

Con i pesi di $w_{i,j}$ dipendenti dalle classi di intensità riportate in Tabella 64.

Tabella 64. Pesi dei criteri e alle classi di intensità relativi all'indice di mitigazione della UHI delle facciate verdi

Criterio	Pesi (v_i) [valore]	Classe di intensità	Peso della classe di intensità ($w_{i,j}$) [valore]
Altezza	v_1 [0.139]	Altezza 5 m	$w_{1,1}$ [0.51]
		Altezza 10 m	$w_{1,2}$ [0.71]
		Altezza 20 m	$w_{1,3}$ [0.93]
		Altezza 30 m	$w_{1,4}$ [0.99]
		Altezza 40 m	$w_{1,5}$ [1.00]
Copertura	v_2 [0.0061]	Copertura 25%	$w_{2,1}$ [0.29]
		Copertura 50%	$w_{2,2}$ [0.56]
		Copertura 75%	$w_{2,3}$ [0.79]
		Copertura 100%	$w_{2,4}$ [1.00]
LAI	v_3 [0.01]	LAI 1.5	$w_{3,1}$ [0.04]
		LAI 3	$w_{3,2}$ [0.73]
		LAI 5	$w_{3,3}$ [1.00]

Dalla validazione della relazione matematica sintetica ottenuta, si vede che i valori di mitigazione ottenuti mediante l'indice sintetico si discostano rispetto a quelli ottenuti mediante modellazione ENVI-met di massimo il 26.6% quando si considera un'altezza massima degli edifici pari a 40 m. Mentre, in tutti gli altri casi, lo scarto massimo percentuale si attesta intorno a circa il 10%. Gli scarti percentuali sono, pertanto, ritenuti accettabili.
L'equazione individuata è un fattore di caratterizzazione di tipo *midpoint* per passare dalle caratteristiche della facciata verde (i.e., strategia di mitigazione della UHI) alla variazione di temperatura locale. Tale fattore di caratterizzazione *midpoint* è valido per aree urbane caratterizzate da clima mediterraneo (i.e., Csa) e densità urbana di 0.33-0.37.
La Figura 174 mostra come la relazione matematica sintetica sviluppata sia stata inserita all'interno del contesto della metodologia LCA, e in particolare del metodo ReCiPe2016 seguendo l'approccio B. Inoltre, la Figura 174 mostra come la variazione dell'isola di calore urbana confluisca in una categoria di impatto costruita *ad hoc*, ovvero la categoria *midpoint* "Local Warming Potential".

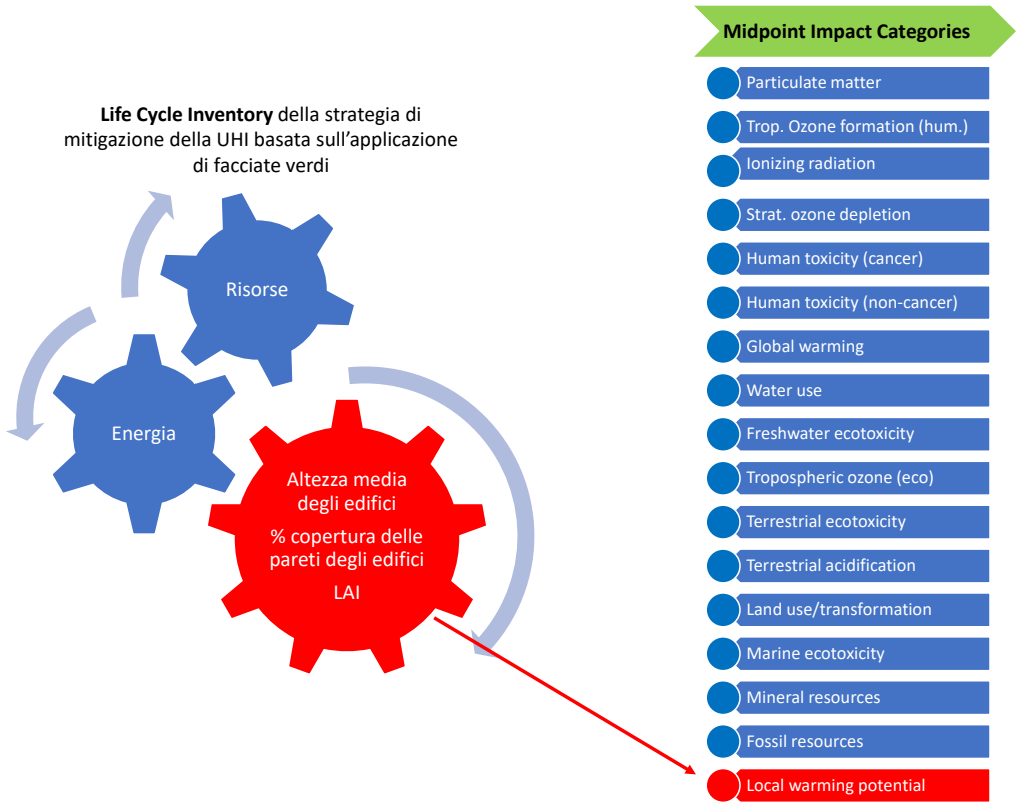


Figura 174. Sviluppo di un modello di caratterizzazione *midpoint* per l'applicazione di facciate verdi come strategia di mitigazione dell'UHI. Approccio B e metodo ReCiPe2016

9.2.2 Applicazione della relazione matematica sintetica (Approccio B) ad un caso di studio

La relazione matematica sintetica relativa all'applicazione di facciate verdi ad un'area urbana è stata applicata al caso di studio relativo all'area urbana di via Lanciani a Roma. In particolare, è stato valutato l'effetto dell'applicazione di pareti verdi con LAI 5 con una copertura del 100% su edifici con altezza media di 20 m. Applicando la relazione matematica sintetica riportata di seguito:

$$I_{GF}^{Mit} = 0.139 * w_{1,j} + 0.0061 * w_{2,j} + 0.01 * w_{3,j}$$

È risultato che lo scenario di mitigazione proposto diminuisce in media, su tutta l'area urbana considerata, la temperatura massima dell'aria di 0.15 °C. Lo stesso scenario è stato sviluppato e simulato in ENVI-met ed è risultata una mitigazione della temperatura massima, rispetto allo scenario di controllo, pari a 0.2 °C. L'errore tra la temperatura prevista mediante l'applicazione della relazione matematica sintetica è la modellazione ENVI-met risulta essere del 25% nel caso in esame.

9.2.3 Sviluppo di un fattore di caratterizzazione *endpoint* relativo alla variazione di temperatura locale

I fattori di caratterizzazione *endpoint* derivano dai fattori di caratterizzazione *midpoint* e sono costanti per categorie d'impatto. Di seguito è riportata l'equazione per il calcolo dei fattori di caratterizzazione *endpoint*:

$$CF_{e_{x,c,a}} = CF_{m_{x,c}} * F_{M \to E,c,a}$$

Dove "*c*" indica la prospettiva culturale, "*a*" indica l'area di protezione (i.e., salute umana, ecosistemi terrestri, ecosistemi d'acqua dolce, ecosistemi marini o scarsità di risorse), "*x*" indica il fattore di stress di interesse, e

$F_{M \to E,c,a}$ è il fattore di conversione da *midpoint* a *endpoint* per la prospettiva culturale c e per l'area di protezione a. I fattori di conversione da *midpoint* a *endpoint* sono costanti per categoria d'impatto perché i meccanismi ambientali sono considerati identici per ciascuno dei fattori di stress dopo le categorie *midpoint* [41].
Nel caso della presente ricerca, definiti gli approcci che si possono utilizzare per calcolare la variazione di temperatura dovuta all'applicazione di strategie di mitigazione della UHI e definita la categoria di impatto innovativa (i.e., Local Warming Potential) ove tale variazione di temperatura converge, è necessario definire i percorsi per far confluire gli impatti in aree di protezione *endpoint* (Figura 175).

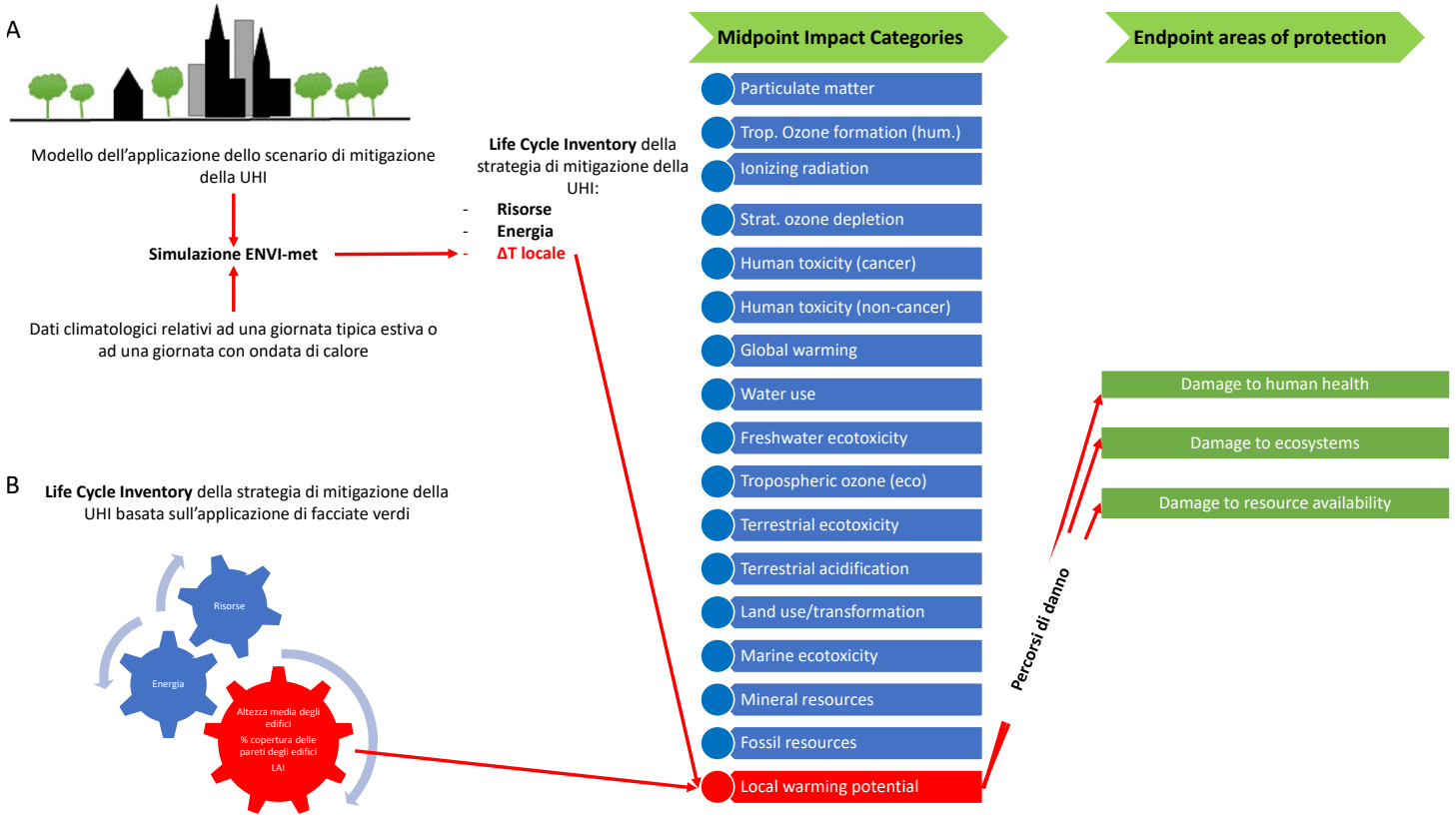


Figura 175. Modellazione degli impatti e dei danni relativi alla modificazione dell'isola di calore urbana dovuta all'implementazione di strategie di mitigazione. Approccio A e B

In particolare, ricalcando i percorsi per la determinazione dei danni relativi all'innalzamento globale della temperatura tipici del metodo ReCiPe2016 [41], sono stati individuati i percorsi per il calcolo dei danni relativi alla variazione di temperatura locale (Figura 176). In particolare, sono stati riportati i percorsi che conducono dalle variazioni di temperatura locali alle tre categorie di interesse: salute umana, ecosistemi e disponibilità di risorse.

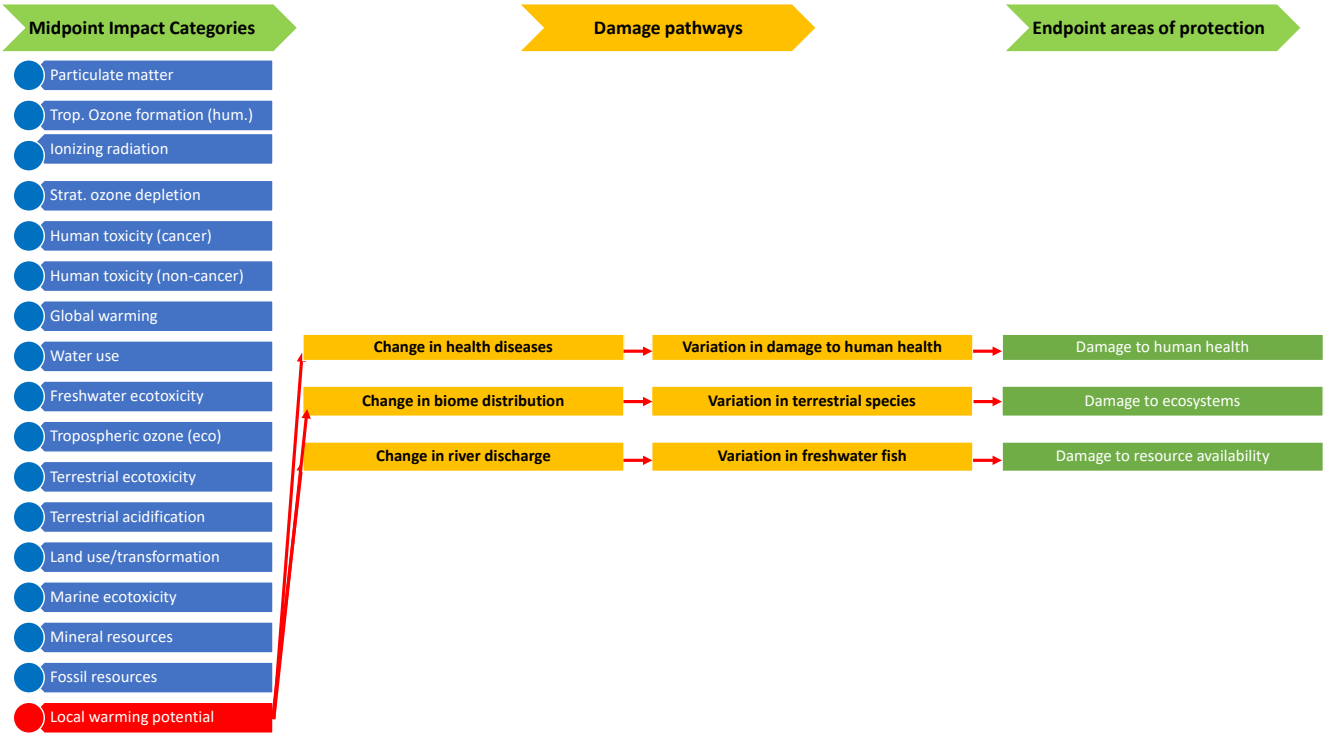


Figura 176. Catena di causa-effetto relativa agli effetti della variazione di temperatura locale relativa a danni alla salute umana, specie terrestri e ecosistema acqua dolce

Inoltre, per quel che riguarda, invece, i potenziali adattamenti futuri agli stress termici [46], questi non verranno considerati adottando un approccio cautelativo, pertanto, un valore unitario verrà utilizzato per la prospettiva individualista, gerarchica ed egalitaria. La scelta di non differenziare le prospettive nasce dall'incertezza relativa a tali adattamenti [47].

Per il calcolo degli effetti della variazione di temperatura sulla salute umana, in accordo con la metrica utilizzata dal metodo ReCiPe2016 per valutare gli effetti globali sulla salute umana, è stata utilizzata il Disability Adjusted Life Years (DALY). Uno studio condotto da Susca (2012) riporta il calcolo degli effetti della variazione di temperatura sulla salute umana [48]. Nel presente studio verrà utilizzata la stessa metodologia. In particolare, la mortalità pre e post l'applicazione di strategie di mitigazione verrà calcolata come di seguito:

$$N_{Morti} = RR_{UHI} \cdot N \quad (1)$$

$$N_{Morti\,mit} = RR_{UHI\,Mit} \cdot N \quad (2)$$

Dove, N_{Morti} è il numero di morti relative alla temperatura media della singola giornata estiva senza che nessuna strategia di mitigazione venga applicata all'ambiente urbano, RR_{UHI} è il rapporto di rischio (i.e., Risk Ratio, RR) relativo alla temperatura media raggiunta durante la singola giornata considerata della stagione estiva e senza che nessuna strategia di mitigazione venga applicata all'ambiente urbano e N è il numero di morti per cause naturali non influenzate dagli stress termici. $N_{Morti\ mit}$ è il numero di morti relative alla temperatura media giornaliera della singola giornata estiva dopo che la strategia di mitigazione venga applicata, $RR_{UHI\ Mit}$ è il rapporto di rischio relativo alla temperatura media giornaliera raggiunta durante la singola giornata considerata della stagione estiva dopo l'applicazione di una strategia di mitigazione. La variazione di mortalità dovuta all'applicazione della strategia di mitigazione delle UHI verrà calcolata come di seguito:

$$\Delta N = N_{Morti} - N_{Morti\,mit} \quad (3)$$

La variazione di mortalità verrà calcolata sia per una giornata tipica estiva che per una giornata con ondata di calore. Il numero di DALY evitati per effetto dell'applicazione delle misure di mitigazione della UHI verrà quindi così calcolato:

$$DALY = \Delta N \cdot \sum_i Perc_i \cdot Exp_i \quad (4)$$

Dove $Perc_i$ ed Exp_i sono rispettivamente la percentuale di morti suddivisa per fasce di età e l'aspettativa di vita. Per ciascun caso di studio dovranno essere dunque reperiti dati circa il rapporto di rischio per la specifica città o area climatica, in numero di morti per cause naturali, la percentuale di morti per cause naturali per fasce di età e l'aspettativa di vita per fasce d'età.

10 *Life Cycle Assessment* delle tecnologie verdi di involucro: applicazione ad un caso di studio

Per l'applicazione della metodologia LCA al caso di studio, è stato scelto il metodo ReCiPe 2016 [41]. In particolare, per il caso di studio sono stati calcolati sia gli impatti *midpoint* sia quelli *endpoint*. Inoltre, per il calcolo degli impatti è stata utilizzata la prospettiva *Hierarchist* che considera gli impatti calcolati per un orizzonte temporale di 100 anni. L'unità funzionale dello studio è l'intera strategia di mitigazione, mentre di seguito (i.e., Sezione 10.2 e Sezione 10.3) verranno riportati gli *input* e gli *output* relativi ad 1 m^2 di superficie di tetto e facciata verde. Mentre l'orizzonte temporale della valutazione LCA è pari a 50 anni.

10.1 Casi di studio

Di seguito sono stati riportati due casi di studio. Il primo è relativo all'applicazione dello scenario di mitigazione RM1 e il secondo è relativo all'applicazione dello scenario RM2 (Figura 177).

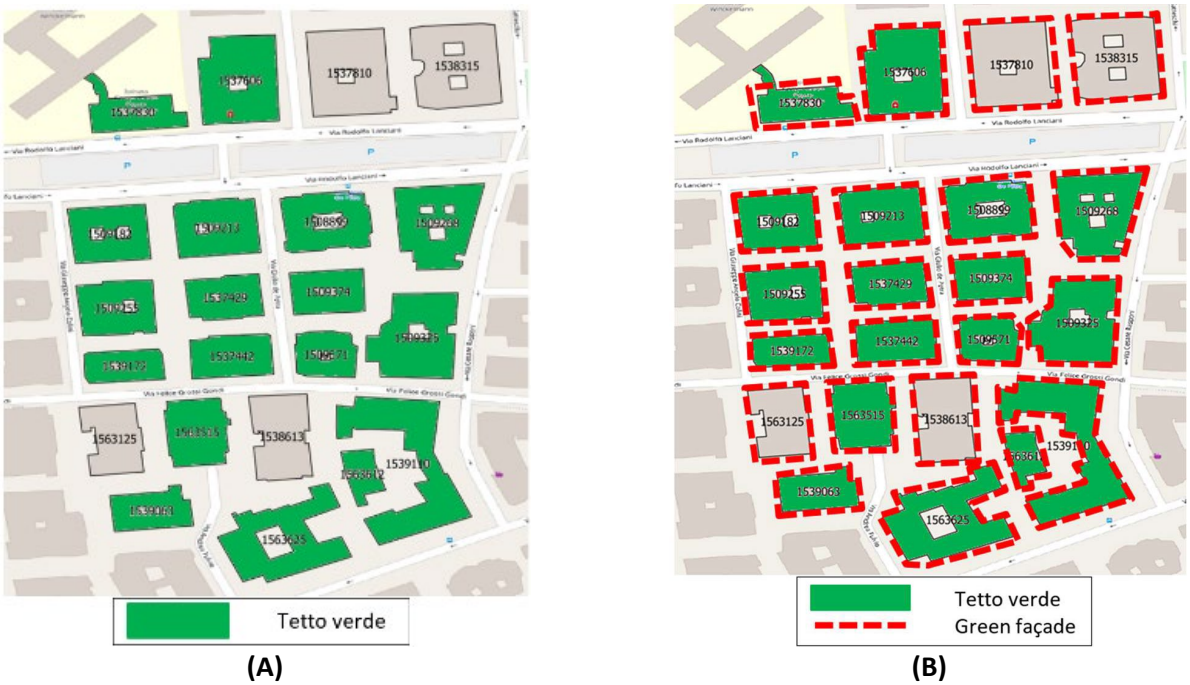


Figura 177. Scenari di mitigazione RM1 (i.e., (A)) e RM2 (i.e., (B))

Il primo caso di studio è stato scelto perché indaga uno scenario di mitigazione in cui è installata una sola tecnologia verde d'involucro (i.e., tetti verdi estensivi); mentre il secondo perché prevede l'applicazione dello scenario che massimizza la mitigazione media dell'isola di calore urbana.

Il caso di studio con scenario RM1 prevede l'installazione di circa 12335.5 m^2 di tetti verdi estensivi, mentre il caso di studio con scenario RM2 prevede l'installazione di 12335.5 m^2 di tetti verdi estensivi e di 59813 m^2 di facciate verdi indirette.

Per il caso di studio che prevede l'applicazione dello scenario di mitigazione RM1 è stato applicato l'approccio indicato in Figura 166 come approccio B; mentre, per il caso di studio che prevede l'applicazione dello scenario di mitigazione RM2 è stato applicato l'approccio A.

10.2 LCI e impatti del tetto verde estensivo

Per quel che riguarda i componenti del tetto verde estensivo, i materiali costituenti lo stesso sono stati reperiti nei *database* di SimaPro. Alcuni dei materiali/processi presenti nel *database* sono stati modificati. Per esempio,

per il mix di *sedum* è stato considerato il processo "seedlings, at greenhouse". Questo processo è presente nel *database* USLCI, che considera *input* nella tecnosfera relativi agli Stati Uniti. Pertanto, il processo "seedlings, at greenhouse, US" è stato modificato con input relativi all'Europa al fine di poterlo utilizzare nella modellazione dei tetti verdi estensivi considerati nel caso di studio. In particolare, è stata modificata la provenienza della corrente elettrica e del combustibile utilizzati con implicazioni sul mix energetico utilizzato e relativi impatti, mentre gli altri *input* da tecnosfera sono rimasti invariati sia perché presenti all'interno del processo in quantità minime e con impatti marginali rispetto agli *input* di processo sostituiti, sia perché non sono presenti nei *database* disponibili in SimaPro equivalenti per l'Europa. Gli impatti relativi al processo "seedlings, at greenhouse, EU" sono stati riportati in Appendice Tabella 96–Tabella 100. Poiché il *database* fa riferimento al singolo processo (i.e., oggetto) piuttosto che quantità espresse in termini di peso, è stato assunto che le piante di *sedum*, approssimate al processo "seedlings, at greenhouse, EU", vengano disposte a 20 cm le une dalle altre e che, quindi, in un metro quadrato di tetto verde vengano messe a dimora 25 piante di *sedum*. Per quanto riguarda gli altri processi necessari per la costruzione del tetto verde estensivo, i materiali scelti sono stati preferibilmente scelti quelli in cui gli *input* fossero riferibili al territorio europeo. Tuttavia, ogni qual volta non siano stato trovati nel *database* di SimaPro processi riferibili al territorio Europeo, sono stati selezionati processi riferiti a tecnologie globali.

Di seguito sono riportate le quantità dei materiali e delle risorse utilizzate nell'orizzonte temporale dei 50 anni, ovvero l'orizzonte temporale scelto per la valutazione degli impatti dell'applicazione delle tecnologie verdi di involucro. Lo studio degli impatti relativi alla installazione di tecnologie verdi di involucro è stato condotto considerando come scenario *baseline* la presenza di tetti e soluzioni di involucro tradizionali. Pertanto, l'estensione della vita utile della membrana bituminosa e la conseguente mancata sostituzione rispetto ad un tetto piano tradizionale verrà considerata nella fase d'uso come impatto evitato. Le quantità dei materiali e delle risorse utilizzate durante il ciclo di vita del tetto verde e riportate di seguito, sono da intendersi riferite ad una superficie di un metro quadrato.

Fasi A1-A3 (fornitura del materiale, trasporto, manifattura): tutti i processi considerati in questa fase includono anche gli eventuali trasporti della materia prima necessaria per la manifattura degli stessi.

Fasi A4-A5 (trasporto e costruzione/installazione): in queste fasi verrà considerato solo il trasporto perché la fase di costruzione/installazione è manuale e richiede un utilizzo di energia talmente esiguo da poter essere considerato nullo. Per quel che riguarda la fase di trasporto, la quantità di materiali trasportata espressa in tonnellate viene moltiplicata per la distanza (i.e., 700 km) poiché il processo considera come unità di misura tkm.

Fasi B1-B7 (uso, manutenzione, riparazione, sostituzione, rinnovo, energia e acqua di funzionamento): durante la fase d'uso, l'installazione di tetti verdi determinerà una variazione dell'uso di energia. Di seguito la variazione dell'uso di energia non verrà considerata perché quanto riportato in questa sezione dello studio è riferito ad una superficie pari ad un metro quadrato di tetto verde e quindi non comprende l'edificio. Tuttavia, nella valutazione degli impatti relativi all'applicazione dello scenario di mitigazione (i.e., sezione 10.6) verrà considerata. Nella fase di manutenzione verranno considerate la sostituzione delle essenze vegetali e l'aggiunta del substrato di vegetazione. In particolare, nell'orizzonte temporale di 50 anni, 15 kg di pomice, 7.5 di sabbia e 2 kg di torba verranno ripristinati. Invece, per le operazioni di diserbo e sostituzione delle piante vengono effettuate manualmente e pertanto non richiedono l'utilizzo di energia; di conseguenza, in accordo con altri studi (e.g., [49], [50]), verrà considerato un contributo nullo nella LCA. Inoltre, nei 50 anni, la vegetazione secca verrà sostituita con 6.25 kg di nuove piante che verranno trasportate da una distanza di 50 km per mezzo di un camion di piccole dimensioni (i.e., <10 t). La stessa distanza verrà considerata per il calcolo degli impatti evitati relativi alla mancata sostituzione della guaina bituminosa e per quelli relativi al trasporto di pomice, sabbia e torba. In questo caso viene considerato un trasporto di 50 km con camion di medie dimensioni (i.e., 10-20 t).

Fasi C1-C4: La fase di decostruzione ha un contributo nullo o assimilabile a zero (e.g., [50]–[52]). Per il trasporto (i.e., C2) di materiali non pericolosi in discarica è stata considerata una distanza di 60 km. In questa fase è anche considerato il trasporto evitato della membrana bituminosa. Per le piante di *sedum* verrà considerato il compostaggio come fine vita (i.e., C4). Non verrà considerata la fase di trattamento dei rifiuti (i.e., C3) poiché i rifiuti non sono pericolosi, ma verrà considerato lo smaltimento dei materiali inerti in discarica. Questa fase

comprende anche il mancato smaltimento della guaina bituminosa che sarebbe dovuta essere sostituita nel corso dei 50 anni. Mentre per le piante di *sedum* verrà considerato il compostaggio come fine vita (i.e., C4). Tabella 65 mostra tutti i materiali, attività, processi e quantità relative alla LCA di 1 m^2 di tetto verde estensivo calcolati in un orizzonte temporale di 50 anni suddivisi a seconda delle fasi del ciclo di vita.

Tabella 65. Indicazione dei materiali, attività, processi e quantità considerate nella LCA di 1 m^2 di tetto verde estensivo

	Materiale/attività	Processo	Unità	Peso (kg/m^2)
Fasi A1-A3	Mix di Sedum	Seedlings, at greeenhouse/EU	25	5
	Pomice	Pumice/GLO/market for/APOS S		48
	Sabbia	Silica sand/GLO/market for/APOS S		24
	Torba	Peat/GLO/market for/APOS S		6.5
	Polipropilene	Oriented polypropylene film E		0.16
	Schiuma in polistirene in grani	Polystyrene granulate (PS)/EU-27		1.5
Totale				**85.16**

			Energia	tkm
Fasi A4-A5	Trasporto materiali costituenti il tetto verde estensivo	Transport, truck 10-20t, EURO5, 80%LF, empty return/GLO Mass		59.612
	Costruzione e installazione		0	

			Peso (kg/m^2)	Energia	tkm
Fasi B1-B7	Mix di Sedum	Seedlings, at greeenhouse/EU	6.25		
	Pomice	Pumice/GLO/market for/APOS S	15		
	Sabbia	Silica sand/GLO/market for/APOS S	7.5		
	Torba	Peat/GLO/market for/APOS S	2		
	Trasporto Sedum	Transport, truck <10t, EURO5, 80%LF, default/GLO Mass			0.3125
	Trasporto pomice	Transport, truck 10-20t, EURO5, 80%LF, empty return/GLO Mass			0.75
	Trasporto sabbia	Transport, truck 10-20t, EURO5, 80%LF, empty return/GLO Mass			0.375
	Trasporto torba	Transport, truck 10-20t, EURO5, 80%LF, empty return/GLO Mass			0.1
	Guaina bituminosa	Bitumen adhesive compound, hot {RER}| production | APOS, S	-16		
	Trasporto guaina bituminosa	Transport, truck 10-20t, EURO5, 80%LF, empty return/GLO Mass			-0.8
	Installazione guaina bituminosa			0	
	Piantumazione Sedum			0	
	Acqua di funzionamento			0	

			Peso (kg/m²)	Energia	tkm
Fasi C1-C4	Decostruzione tetto verde estensivo			0	
	Trasporto Sedum alla discarica (5 kg)	Transport, truck 10-20t, EURO5, 80%LF, empty return/GLO Mass			0.3
	Trasporto Sedum alla discarica (6.5 kg)	Transport, truck 10-20t, EURO5, 80%LF, empty return/GLO Mass			0.375
	Trasporto guaina bituminosa alla discarica (-16 kg)	Transport, truck 10-20t, EURO5, 80%LF, empty return/GLO Mass			-0.96
	Trasporto pomice alla discarica (48 kg)	Transport, truck 10-20t, EURO5, 80%LF, empty return/GLO Mass			2.88
	Trasporto sabbia alla discarica (24 kg)	Transport, truck 10-20t, EURO5, 80%LF, empty return/GLO Mass			1.44
	Trasporto torba alla discarica (6.5 kg)	Transport, truck 10-20t, EURO5, 80%LF, empty return/GLO Mass			0.39
	Trasporto polipropilene alla discarica (0.16 kg)	Transport, truck 10-20t, EURO5, 80%LF, empty return/GLO Mass			0.0096
	Trasporto schiuma in polistirene in grani alla discarica (1.5 kg)	Transport, truck 10-20t, EURO5, 80%LF, empty return/GLO Mass			0.09
	Trasporto pomice alla discarica (15 kg)	Transport, truck 10-20t, EURO5, 80%LF, empty return/GLO Mass			0.9
	Trasporto sabbia alla discarica (7.5 kg)	Transport, truck 10-20t, EURO5, 80%LF, empty return/GLO Mass			0.45
	Trasporto torba alla discarica (2 kg)	Transport, truck 10-20t, EURO5, 80%LF, empty return/GLO Mass			0.12
	Compostaggio Sedum	Biowaste {RoW}| treatment of biowaste, industrial composting | APOS, S	11.25		
	Smaltimento dei materiali inerti in discarica	Inert waste, for final disposal {RoW}| treatment of inert waste, inert material landfill | APOS, S	64.16		

In Figura 178 sono riportati gli impatti normalizzati (i.e., *midpoint*) relativi a 1 m^2 di tetto verde estensivo. È possibile notare come gli impatti maggiori sono relativi all'ecotossicità marina e che gli impatti negativi sono dovuti all'uso evitato di membrana bituminosa.

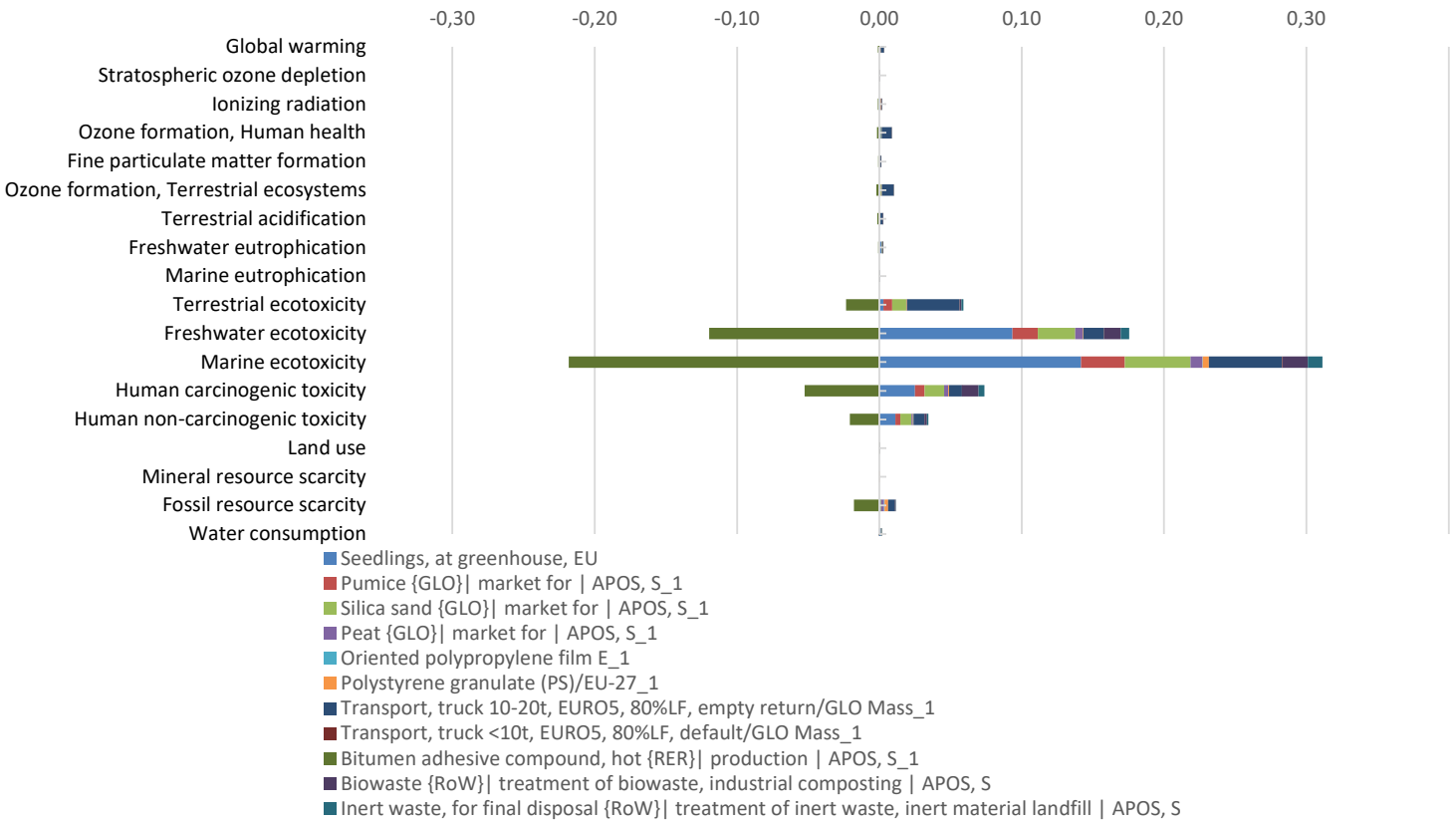


Figura 178. Valutazione degli impatti normalizzati relativi a 1 m^2 di tetto verde (*midpoint*)

In Figura 179 sono riportati i danni (i.e., *endpoint*) relativi al ciclo di vita di 1 m^2 di tetto verde estensivo calcolati nell'orizzonte temporale di 50 anni ed espressi mediante punteggio singolo.

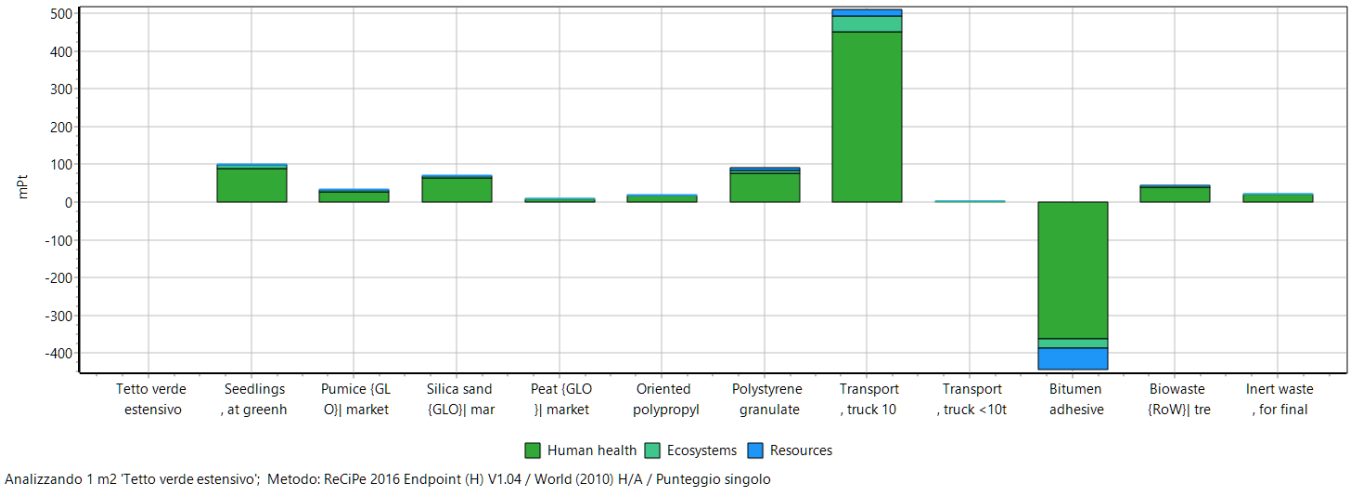


Figura 179. Valutazione dei danni relativi a 1 m^2 di tetto verde estensivo espressi mediante punteggio singolo (*endpoint*)

È possibile notare come il trasporto ha i maggiori impatti sulla salute umana e come la mancata sostituzione della membrana bituminosa, grazie all'installazione del tetto verde estensivo, abbia un impatto evitato di quasi 400 mPt. È anche interessante notare che anche il *sedum* ha un impatto di circa 100 mPt, di gran lunga superiore a quello che hanno la pomice, la torba e il polipropilene. Tuttavia, questo risultato può essere migliorato

sostituendo il *sedum* con un'altra specie vegetale. Studi futuri potranno concentrarsi su l'investigare l'impatto ambientale delle diverse specie vegetali per tetti verdi estensivi.

10.3 LCI e impatti della facciata verde indiretta

Per la facciata verde così come nel caso del tetto verde estensivo, il processo relativo all'*hedera helix* non è presente in nessuno dei database di SimaPro. Pertanto, si è provveduto ad utilizzare il processo "seedlings, at greenhouse, EU" (vedi Sezione 10.2). Nel presente caso di studio viene considerato che in un metro di facciata vengano installate due piante di edera.

Fasi A1-A3 (fornitura del materiale, trasporto, manifattura): tutti i processi considerati in questa fase includono anche gli eventuali trasporti della materia prima necessaria per la manifattura degli stessi.

Fasi A4-A5 (trasporto e costruzione/installazione): in queste fasi verrà considerato solo il trasporto perché la fase di costruzione/installazione è manuale e richiede un utilizzo di energia talmente esiguo da poter essere considerato nullo. Per quel che riguarda la fase di trasporto, la quantità di materiali trasportata espressa in tonnellate viene moltiplicata per la distanza (i.e., 700 km) poiché il processo considera come unità di misura tkm.

Fasi B1-B7 (uso, manutenzione, riparazione, sostituzione, rinnovo, energia e acqua di funzionamento): durante la fase d'uso, l'installazione di facciate verdi determinerà una variazione dell'uso di energia. Di seguito la variazione dell'uso di energia non verrà considerata perché quanto riportato in questa sezione dello studio è riferito ad una superficie pari ad un metro quadrato di facciata verde e quindi non comprende l'edificio. Tuttavia, nella valutazione degli impatti relativi all'applicazione dello scenario di mitigazione (i.e, sezione 10.6) verrà considerata. Nella fase di manutenzione verrà considerata la sostituzione delle essenze vegetali. In particolare, nell'orizzonte temporale di 50 anni, 10.8 kg di *Hedera helix* verranno trasportati per 50 km con camion di piccole dimensioni (i.e., <10 t) e sostituiti. Le operazioni di diserbo e sostituzione delle piante vengono effettuate manualmente e pertanto non richiedono l'utilizzo di energia.

Fasi C1-C4: La fase di decostruzione ha un contributo nullo o assimilabile a zero [53]. Per il trasporto (i.e., C2) di materiali non pericolosi in discarica è stata considerata una distanza di 60 km. Per le piante di *Hedera helix* verrà considerato il compostaggio come fine vita (i.e., C4). Non verrà considerata la fase di trattamento dei rifiuti (i.e., C3) poiché i rifiuti non sono pericolosi, ma verrà considerato lo smaltimento dei materiali inerti in discarica.

La Tabella 66 mostra tutti i materiali, attività, processi e quantità relative alla LCA di 1 m^2 di facciata verde calcolati in un orizzonte temporale di 50 anni suddivisi a seconda delle fasi del ciclo di vita.

Tabella 66. Indicazione dei materiali, attività, processi e quantità considerate nella LCA di 1 m^2 di facciata verde

	Materiale/attività	Processo	Unità	Peso (kg/m^2)
Fasi A1-A3	Hedera helix	Seedlings, at greeenhouse/EU	2	2.7
	Griglia di supporto	Steel cold rolled coil/EU		1.55
	Staffe distanziali e bulloni	Steel engineering steel/EU		0.06
Totale				**4.31**

			Energia	tkm
Fasi A4-A5	Trasporto materiali costituenti la facciata verde	Transport, truck 10-20t, EURO5, 80%LF, empty return/GLO Mass		3.02
	Costruzione e installazione		0	

			Peso (kg/m^2)	Energia	tkm
Fasi B1-B7	Hedera helix	Seedlings, at greeenhouse/EU	10.8		

	Trasporto Hedera helix	Transport, truck <10t, EURO5, 80%LF, default/GLO Mass		0.54
	Piantumazione Hedera helix		0	
	Acqua di funzionamento		0	

			Peso (kg/m²)	Energia	tkm
Fasi C1-C4	Decostruzione parete verde			0	
	Trasporto Hedera helix alla discarica (2.7 kg)	Transport, truck <10t, EURO5, 80%LF, default/GLO Mass			0.162
	Trasporto Hedera helix alla discarica (10.8 kg)	Transport, truck <10t, EURO5, 80%LF, default/GLO Mass			0.648
	Trasporto griglia di supporto alla discarica (1.55 kg)	Transport, truck <10t, EURO5, 80%LF, default/GLO Mass			0.093
	Trasporto staffe distanziali e bulloni (0.06 kg)	Transport, truck <10t, EURO5, 80%LF, default/GLO Mass			0.0036
	Compostaggio Hedera helix	Biowaste {RoW}| treatment of biowaste, industrial composting | APOS, S	13.5		
	Smaltimento dei materiali inerti in discarica	Inert waste, for final disposal {RoW}| treatment of inert waste, inert material landfill | APOS, S	1.61		

In Figura 180 sono riportati gli impatti normalizzati (i.e., *midpoint*) relativi a 1 m² di facciata verde. È possibile notare come gli impatti maggiori sono relativi all'ecotossicità marina dovuti sia agli impatti relativi alla piantumazione e crescita delle piante in serra sia al compostaggio delle stesse.

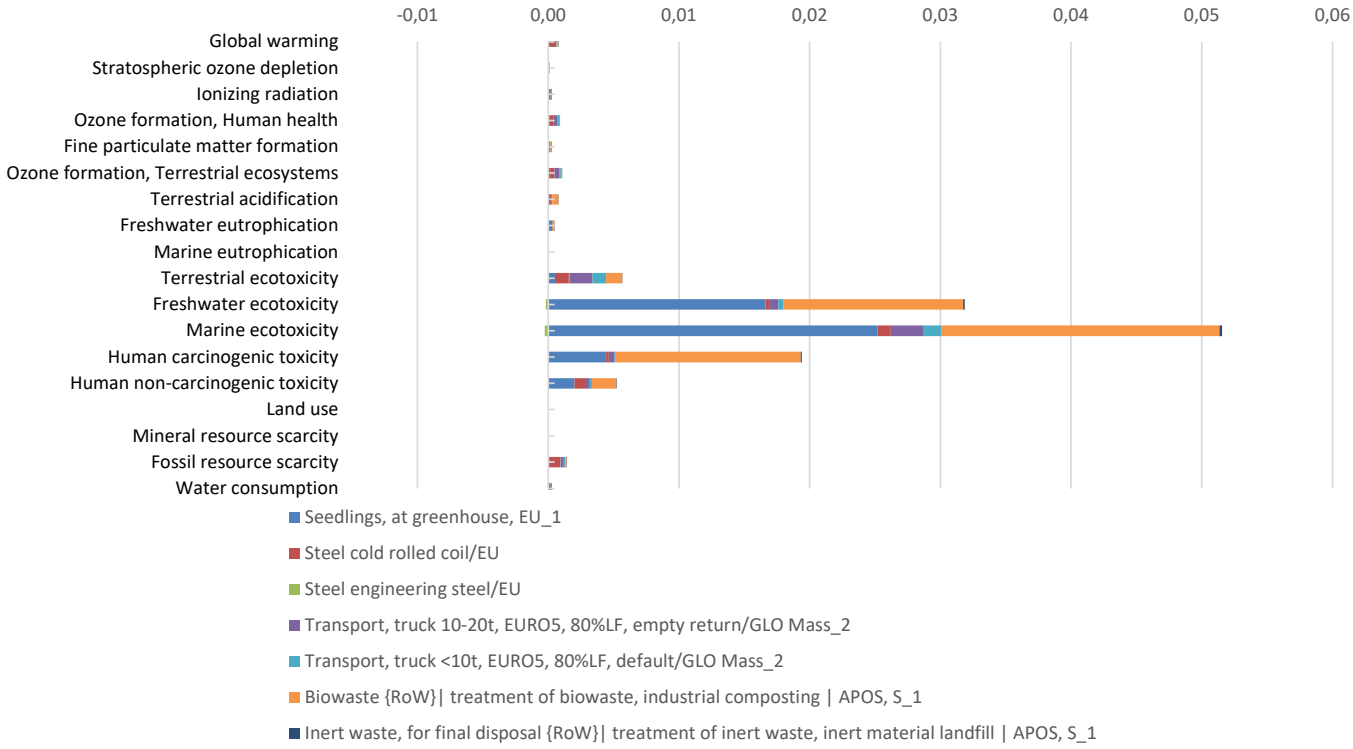


Figura 180. Valutazione degli impatti normalizzati relativi a 1 m² di facciata verde (*midpoint*)

In Figura 181 sono riportati i danni (i.e., *endpoint*) relativi al ciclo di vita di 1 m^2 di facciata verde calcolati nell'orizzonte temporale di 50 anni ed espressi mediante punteggio singolo.

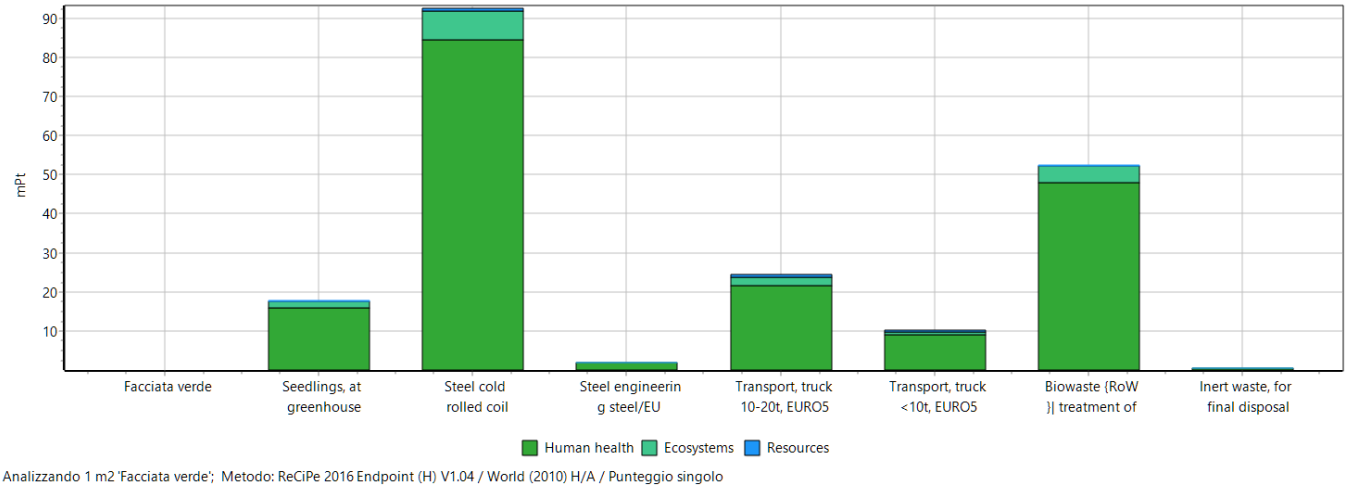


Figura 181. Valutazione dei danni relativi a 1 m^2 di facciata verde espressi mediante punteggio singolo (*endopoint*)

È possibile notare che i maggiori impatti sono relativi alla manifattura della griglia di supporto in acciaio e al compostaggio delle piante di *hedera helix*.
Tuttavia, dal confronto tra 1 m^2 di tetto verde estensivo e la stessa superficie di facciata verde, è possibile notare che i danni relativi alla facciata verde, calcolati in un orizzonte temporale di 50 anni, sono circa la metà di quelli relativi al tetto verde estensivo (Figura 181).

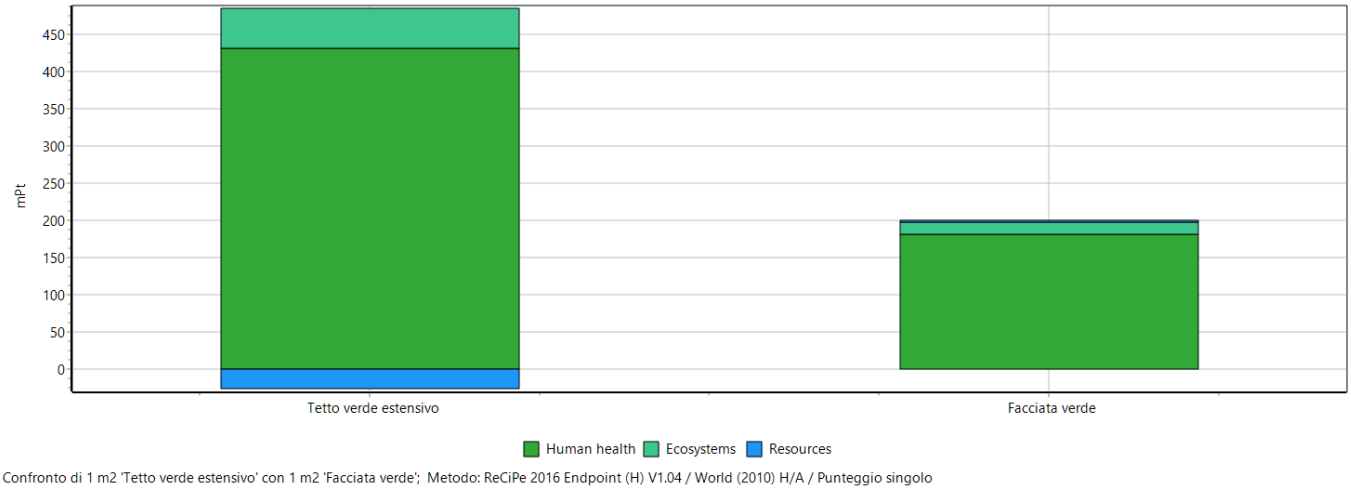


Figura 182. Confronto tra i danni relativi a 1 m^2 di tetto verde estensivo e facciata verde espressi mediante punteggio singolo (*endpoint*)

10.4 Variazione di energia nella fase d'uso scenario

Mediante l'utilizzo del modello semplificato per il calcolo dei consumi energetici, sono stati calcolati i consumi energetici degli edifici per l'area urbana di Roma di via Lanciani relativi agli scenari base per le tre giornate significative e relative agli scenari RM1 e RM2. Di seguito sono stati riportati i consumi aggregati relativi agli scenari (Tabella 70).

Per il calcolo è stato utilizzato il foglio di calcolo sviluppato dall'Università degli Studi di Catania nel corso del PAR 2012-14 (per una descrizione dettagliata vedere [31]) e modificato da ENEA nel corso del PAR 2015 [32], [33]. Gli edifici simulati per lo scenario *baseline* sono quelli identificati per l'aerea urbana di via Lanciani nel corso della LA2.7 [15]. I valori di radiazione solare utilizzati come *input* nel modello semplificato per gli scenari *baseline* e per gli scenari di mitigazione sono quelli delle giornate tipiche estiva, con ondata di calore ed invernale, registrati dalla stazione meteorologica di via Lanciani. I valori di temperatura dell'aria utilizzati come *input* sono stati ricavati dai valori orari di temperatura media ottenuti come *output* dalle simulazioni effettuate con ENVI-met. I parametri termofisici e di input degli edifici adottati sono riassunti nelle tabelle da Tabella 67 a Tabella 69.

Tabella 67. Parametri di *input* degli edifici, scenario *baseline*

		EDIFICIO																					
Parete		1537830	1509325	1508899	1563625	1509268	1509213	1509255	1509182	1509571	1537429	1563125	1563515	1538613	1539110	1509374	1537442	1539172	1563612	1539063	1537606	1538315	1537810
Nord	U	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10
Fin. Nord		4.90	4.90	4.90	4.90	4.90	4.90	4.90	4.90	4.90	4.90	4.90	4.90	4.90	4.90	4.90	4.90	4.90	4.90	4.90	4.90	4.90	4.90
Sud		1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10
Fin. Sud		4.90	4.90	4.90	4.90	4.90	4.90	4.90	4.90	4.90	4.90	4.90	4.90	4.90	4.90	4.90	4.90	4.90	4.90	4.90	4.90	4.90	4.90
Est		1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10
Fin. Est		4.90	4.90	4.90	4.90	4.90	4.90	4.90	4.90	4.90	4.90	4.90	4.90	4.90	4.90	4.90	4.90	4.90	4.90	4.90	4.90	4.90	4.90
Ovest		1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10
Fin. Ovest		4.90	4.90	4.90	4.90	4.90	4.90	4.90	4.90	4.90	4.90	4.90	4.90	4.90	4.90	4.90	4.90	4.90	4.90	4.90	4.90	4.90	4.90
Pavimento		1.45	1.45	1.45	1.45	1.45	1.45	1.45	1.45	1.45	1.45	1.45	1.45	1.45	1.45	1.45	1.45	1.45	1.45	1.45	1.45	1.45	1.45
Soffitto		1.74	1.74	1.74	1.74	1.74	1.74	1.74	1.74	1.74	1.74	1.74	1.74	1.74	1.74	1.74	1.74	1.74	1.74	1.74	1.74	0.60	0.60
Nord	S	148.11	544.08	742.91	1345.54	660.05	577.36	485.42	644.28	483.31	459.07	356.58	391.15	360.42	774.43	476.57	555.78	586.38	191.60	521.80	564.63	681.63	520.84
Fin. Nord		20.58	142.91	132.25	150.17	156.90	149.02	88.13	126.36	73.42	97.61	74.72	115.97	84.23	143.97	97.99	111.14	73.98	24.98	100.37	122.79	163.93	178.46
Sud		148.11	544.08	742.91	1345.54	660.05	577.36	485.42	644.28	483.31	459.07	356.58	391.15	360.42	774.43	476.57	555.78	586.38	191.60	521.80	564.63	681.63	520.84
Fin. Sud		20.58	142.91	132.25	150.17	156.90	149.02	88.13	126.36	73.42	97.61	74.72	115.97	84.23	143.97	97.99	111.14	73.98	24.98	100.37	122.79	163.93	178.46
Est		65.19	747.03	640.20	927.86	872.03	542.65	494.67	656.03	465.77	355.66	605.60	581.04	736.38	1153.06	369.83	377.47	305.12	358.49	314.80	783.91	804.55	721.47
Fin. Est		9.06	196.23	113.96	103.55	207.29	140.06	89.81	128.66	70.76	75.62	126.90	172.26	172.09	214.36	76.04	75.48	38.49	46.74	60.55	170.48	193.49	247.20
Ovest		65.19	747.03	640.20	543.47	872.03	542.65	494.67	673.50	465.77	355.66	605.60	581.04	736.38	1153.06	369.83	377.47	305.12	358.49	314.80	783.91	804.55	721.47
Fin. Ovest		9.06	196.23	113.96	60.65	207.29	140.06	89.81	132.09	70.76	75.62	126.90	172.26	172.09	214.36	76.04	75.48	38.49	46.74	60.55	170.48	193.49	247.20
Pavimento		526.89	1004.86	729.52	1032.32	924.93	734.16	632.65	652.04	427.20	513.27	597.40	640.51	759.47	1274.08	515.65	552.96	399.91	255.01	476.80	1042.76	1059.02	1081.03
Soffitto		526.89	1004.86	729.52	1032.32	924.93	734.16	632.65	652.04	427.20	513.27	597.40	640.51	759.47	1274.08	515.65	552.96	399.91	255.01	476.80	1042.76	1059.02	1081.03
Nord	a o g	0.26	0.26	0.26	0.66	0.26	0.55	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26	0.66	0.55	0.84	0.23	0.26	0.26	0.26	0.55	0.26	0.55	0.26
Fin. Nord		0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85
Sud		0.26	0.26	0.26	0.66	0.26	0.55	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26	0.66	0.55	0.84	0.23	0.26	0.26	0.26	0.55	0.26	0.55	0.26
Fin. Sud		0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85
Est		0.26	0.26	0.26	0.66	0.26	0.55	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26	0.66	0.55	0.84	0.23	0.26	0.26	0.26	0.55	0.26	0.55	0.26
Fin. Est		0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85
Ovest		0.26	0.26	0.26	0.66	0.26	0.55	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26	0.66	0.55	0.84	0.23	0.26	0.26	0.26	0.55	0.26	0.55	0.26
Fin. Ovest		0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85
Pavimento		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Soffitto		0.61	0.51	0.26	0.61	0.61	0.51	0.51	0.51	0.26	0.51	0.26	0.26	0.26	0.61	0.51	0.51	0.51	0.61	0.61	0.51	0.60	0.60
Nord	Fsh	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90
Fin. Nord		0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90
Sud		0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90
Fin. Sud		0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90
Est		0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90
Fin. Est		0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90
Ovest		0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90
Fin. Ovest		0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90
Pavimento		0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90
Soffitto		1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
H.altezza		4.41	18.36	19.89	16.11	18.45	19.71	16.92	18.81	20.34	19.17	20.43	21.87	20.61	14.40	20.16	20.97	21.51	17.55	20.07	18.36	17.82	18.90
Af		474.20	5426.25	3939.43	3716.36	5827.03	4625.24	2846.95	4107.83	2306.87	2771.67	3225.95	4611.64	4101.11	5733.37	2784.53	2985.96	1799.58	1147.55	2574.75	4692.44	5718.69	6810.51

Tabella 68. Parametri di *input* degli edifici, scenario RM1

		EDIFICIO																					
Parete		1537830	1509325	1508899	1563625	1509268	1509213	1509255	1509182	1509571	1537429	1563125	1563515	1538613	1539110	1509374	1537442	1539172	1563612	1539063	1537606	1538315	1537810
Nord	U	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10
Fin. Nord		4.90	4.90	4.90	4.90	4.90	4.90	4.90	4.90	4.90	4.90	4.90	4.90	4.90	4.90	4.90	4.90	4.90	4.90	4.90	4.90	4.90	4.90
Sud		1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10
Fin. Sud		4.90	4.90	4.90	4.90	4.90	4.90	4.90	4.90	4.90	4.90	4.90	4.90	4.90	4.90	4.90	4.90	4.90	4.90	4.90	4.90	4.90	4.90
Est		1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10
Fin. Est		4.90	4.90	4.90	4.90	4.90	4.90	4.90	4.90	4.90	4.90	4.90	4.90	4.90	4.90	4.90	4.90	4.90	4.90	4.90	4.90	4.90	4.90
Ovest		1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10
Fin. Ovest		4.90	4.90	4.90	4.90	4.90	4.90	4.90	4.90	4.90	4.90	4.90	4.90	4.90	4.90	4.90	4.90	4.90	4.90	4.90	4.90	4.90	4.90
Pavimento		1.45	1.45	1.45	1.45	1.45	1.45	1.45	1.45	1.45	1.45	1.45	1.45	1.45	1.45	1.45	1.45	1.45	1.45	1.45	1.45	1.45	1.45
Soffitto		1.74	1.74	1.74	1.74	1.74	1.74	1.74	1.74	1.74	1.74	1.74	1.74	1.74	1.74	1.74	1.74	1.74	1.74	1.74	1.74	0.60	0.60
Nord	S	148.11	544.08	742.91	1345.54	660.05	577.36	485.42	644.28	483.31	459.07	356.58	391.15	360.42	774.43	476.57	555.78	586.38	191.60	521.80	564.63	681.63	520.84
Fin. Nord		20.58	142.91	132.25	150.17	156.90	149.02	88.13	126.36	73.42	97.61	74.72	115.97	84.23	143.97	97.99	111.14	73.98	24.98	100.37	122.79	163.93	178.46
Sud		148.11	544.08	742.91	1345.54	660.05	577.36	485.42	644.28	483.31	459.07	356.58	391.15	360.42	774.43	476.57	555.78	586.38	191.60	521.80	564.63	681.63	520.84
Fin. Sud		20.58	142.91	132.25	150.17	156.90	149.02	88.13	126.36	73.42	97.61	74.72	115.97	84.23	143.97	97.99	111.14	73.98	24.98	100.37	122.79	163.93	178.46
Est		65.19	747.03	640.20	927.86	872.03	542.65	494.67	656.03	465.77	355.66	605.60	581.04	736.38	1153.06	369.83	377.47	305.12	358.49	314.80	783.91	804.55	721.47
Fin. Est		9.06	196.23	113.96	103.55	207.29	140.06	89.81	128.66	70.76	75.62	126.90	172.26	172.09	214.36	76.04	75.48	38.49	46.74	60.55	170.48	193.49	247.20
Ovest		65.19	747.03	640.20	543.47	872.03	542.65	494.67	673.50	465.77	355.66	605.60	581.04	736.38	1153.06	369.83	377.47	305.12	358.49	314.80	783.91	804.55	721.47
Fin. Ovest		9.06	196.23	113.96	60.65	207.29	140.06	89.81	132.09	70.76	75.62	126.90	172.26	172.09	214.36	76.04	75.48	38.49	46.74	60.55	170.48	193.49	247.20
Pavimento		526.89	1004.86	729.52	1032.32	924.93	734.16	632.65	652.04	427.20	513.27	597.40	640.51	759.47	1274.08	515.65	552.96	399.91	255.01	476.80	1042.76	1059.02	1081.03
Soffitto		526.89	1004.86	729.52	1032.32	924.93	734.16	632.65	652.04	427.20	513.27	597.40	640.51	759.47	1274.08	515.65	552.96	399.91	255.01	476.80	1042.76	1059.02	1081.03
Nord	a o g	0.26	0.26	0.26	0.66	0.26	0.55	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26	0.66	0.55	0.84	0.23	0.26	0.26	0.26	0.55	0.26	0.55	0.26
Fin. Nord		0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85
Sud		0.26	0.26	0.26	0.66	0.26	0.55	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26	0.66	0.55	0.84	0.23	0.26	0.26	0.26	0.55	0.26	0.55	0.26
Fin. Sud		0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85
Est		0.26	0.26	0.26	0.66	0.26	0.55	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26	0.66	0.55	0.84	0.23	0.26	0.26	0.26	0.55	0.26	0.55	0.26
Fin. Est		0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85
Ovest		0.26	0.26	0.26	0.66	0.26	0.55	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26	0.66	0.55	0.84	0.23	0.26	0.26	0.26	0.55	0.26	0.55	0.26
Fin. Ovest		0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85
Pavimento		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Soffitto		0.61	0.51	0.26	0.61	0.61	0.51	0.51	0.51	0.26	0.51	0.26	0.26	0.26	0.61	0.51	0.51	0.51	0.61	0.61	0.51	0.60	0.60
Nord	Fsh	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90
Fin. Nord		0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90
Sud		0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90
Fin. Sud		0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90
Est		0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90
Fin. Est		0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90
Ovest		0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90
Fin. Ovest		0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90
Pavimento		0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90
Soffitto		1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
H.altezza		4.41	18.36	19.89	16.11	18.45	19.71	16.92	18.81	20.34	19.17	20.43	21.87	20.61	14.40	20.16	20.97	21.51	17.55	20.07	18.36	17.82	18.90
Af		474.20	5426.25	3939.43	3716.36	5827.03	4625.24	2846.95	4107.83	2306.87	2771.67	3225.95	4611.64	4101.11	5733.37	2784.53	2985.96	1799.58	1147.55	2574.75	4692.44	5718.69	6810.51

Tabella 69. Parametri di *input* degli edifici, scenario RM2

		EDIFICIO																					
Parete		1537830	1509325	1508899	1563625	1509268	1509213	1509255	1509182	1509571	1537429	1563125	1563515	1538613	1539110	1509374	1537442	1539172	1563612	1539063	1537606	1538315	1537810
Nord	U	1.100	1.100	1.100	1.100	1.100	1.100	1.100	1.100	1.100	1.100	1.100	1.100	1.100	1.100	1.100	1.100	1.100	1.100	1.100	1.100	1.100	1.100
Fin. Nord		4.900	4.900	4.900	4.900	4.900	4.900	4.900	4.900	4.900	4.900	4.900	4.900	4.900	4.900	4.900	4.900	4.900	4.900	4.900	4.900	4.900	4.900
Sud		1.100	1.100	1.100	1.100	1.100	1.100	1.100	1.100	1.100	1.100	1.100	1.100	1.100	1.100	1.100	1.100	1.100	1.100	1.100	1.100	1.100	1.100
Fin. Sud		4.900	4.900	4.900	4.900	4.900	4.900	4.900	4.900	4.900	4.900	4.900	4.900	4.900	4.900	4.900	4.900	4.900	4.900	4.900	4.900	4.900	4.900
Est		1.100	1.100	1.100	1.100	1.100	1.100	1.100	1.100	1.100	1.100	1.100	1.100	1.100	1.100	1.100	1.100	1.100	1.100	1.100	1.100	1.100	1.100
Fin. Est		4.900	4.900	4.900	4.900	4.900	4.900	4.900	4.900	4.900	4.900	4.900	4.900	4.900	4.900	4.900	4.900	4.900	4.900	4.900	4.900	4.900	4.900
Ovest		1.100	1.100	1.100	1.100	1.100	1.100	1.100	1.100	1.100	1.100	1.100	1.100	1.100	1.100	1.100	1.100	1.100	1.100	1.100	1.100	1.100	1.100
Fin. Ovest		4.900	4.900	4.900	4.900	4.900	4.900	4.900	4.900	4.900	4.900	4.900	4.900	4.900	4.900	4.900	4.900	4.900	4.900	4.900	4.900	4.900	4.900
Pavimento		1.450	1.450	1.450	1.450	1.450	1.450	1.450	1.450	1.450	1.450	1.450	1.450	1.450	1.450	1.450	1.450	1.450	1.450	1.450	1.450	1.450	1.450
Soffitto		0.776	0.776	0.776	0.776	0.776	0.776	0.776	0.776	0.776	0.776	1.740	0.776	1.740	0.776	0.776	0.776	0.776	0.776	0.776	0.776	0.600	0.600
Nord	S	148.11	544.08	742.91	1345.54	660.05	577.36	485.42	644.28	483.31	459.07	356.58	391.15	360.42	774.43	476.57	555.78	586.38	191.60	521.80	564.63	681.63	520.84
Fin. Nord		20.58	142.91	132.25	150.17	156.90	149.02	88.13	126.36	73.42	97.61	74.72	115.97	84.23	143.97	97.99	111.14	73.98	24.98	100.37	122.79	163.93	178.46
Sud		148.11	544.08	742.91	1345.54	660.05	577.36	485.42	644.28	483.31	459.07	356.58	391.15	360.42	774.43	476.57	555.78	586.38	191.60	521.80	564.63	681.63	520.84
Fin. Sud		20.58	142.91	132.25	150.17	156.90	149.02	88.13	126.36	73.42	97.61	74.72	115.97	84.23	143.97	97.99	111.14	73.98	24.98	100.37	122.79	163.93	178.46
Est		65.19	747.03	640.20	927.86	872.03	542.65	494.67	656.03	465.77	355.66	605.60	581.04	736.38	1153.06	369.83	377.47	305.12	358.49	314.80	783.91	804.55	721.47
Fin. Est		9.06	196.23	113.96	103.55	207.29	140.06	89.81	128.66	70.76	75.62	126.90	172.26	172.09	214.36	76.04	75.48	38.49	46.74	60.55	170.48	193.49	247.20
Ovest		65.19	747.03	640.20	543.47	872.03	542.65	494.67	673.50	465.77	355.66	605.60	581.04	736.38	1153.06	369.83	377.47	305.12	358.49	314.80	783.91	804.55	721.47
Fin. Ovest		9.06	196.23	113.96	60.65	207.29	140.06	89.81	132.09	70.76	75.62	126.90	172.26	172.09	214.36	76.04	75.48	38.49	46.74	60.55	170.48	193.49	247.20
Pavimento		526.89	1004.86	729.52	1032.32	924.93	734.16	632.65	652.04	427.20	513.27	597.40	640.51	759.47	1274.08	515.65	552.96	399.91	255.01	476.80	1042.76	1059.02	1081.03
Soffitto		526.89	1004.86	729.52	1032.32	924.93	734.16	632.65	652.04	427.20	513.27	597.40	640.51	759.47	1274.08	515.65	552.96	399.91	255.01	476.80	1042.76	1059.02	1081.03
Nord	a o g	0.26	0.26	0.26	0.66	0.26	0.55	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26	0.66	0.55	0.84	0.23	0.26	0.26	0.26	0.55	0.26	0.55	0.26
Fin. Nord		0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85
Sud		0.26	0.26	0.26	0.66	0.26	0.55	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26	0.66	0.55	0.84	0.23	0.26	0.26	0.26	0.55	0.26	0.55	0.26
Fin. Sud		0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85
Est		0.26	0.26	0.26	0.66	0.26	0.55	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26	0.66	0.55	0.84	0.23	0.26	0.26	0.26	0.55	0.26	0.55	0.26
Fin. Est		0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85
Ovest		0.26	0.26	0.26	0.66	0.26	0.55	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26	0.66	0.55	0.84	0.23	0.26	0.26	0.26	0.55	0.26	0.55	0.26
Fin. Ovest		0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85
Pavimento		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Soffitto		0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.26	0.35	0.26	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.60	0.60
Nord	Fsh	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
Fin. Nord		0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90
Sud		0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
Fin. Sud		0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90
Est		0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
Fin. Est		0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90
Ovest		0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
Fin. Ovest		0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90
Pavimento		0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90
Soffitto		1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
H.altezza		4.41	18.36	19.89	16.11	18.45	19.71	16.92	18.81	20.34	19.17	20.43	21.87	20.61	14.40	20.16	20.97	21.51	17.55	20.07	18.36	17.82	18.90
Af		474.20	5426.25	3939.43	3716.36	5827.03	4625.24	2846.95	4107.83	2306.87	2771.67	3225.95	4611.64	4101.11	5733.37	2784.53	2985.96	1799.58	1147.55	2574.75	4692.44	5718.69	6810.51

Tabella 70. Consumi energetici aggregati degli edifici relativi agli scenari sviluppati e alle giornate tipiche selezionate

	Giornata tipica estiva (01/07/2015) Consumo energetico per il raffrescamento [kWh]	Giornata tipica con ondata di calore (22/07/2015) Consumo energetico per il raffrescamento [kWh]	Giornata tipica invernale (18/02/2015) Consumo energetico per il riscaldamento [kWh]
Scenario base	13358.17	26100.12	83881.23
RM1	11856.44	24697.72	83675.34
RM2	10899.33	23737.56	85177.20

Di seguito sono riportate le variazioni percentuali dei consumi energetici degli edifici per raffrescamento e riscaldamento relativi alle giornate tipiche degli scenari RM1 e RM2 rispetto agli scenari base (Tabella 71).

Tabella 71.Variazione percentuale dei consumi energetici aggregati nelle giornate tipiche rispetto agli scenari base

	Giornata tipica estiva (01/07/2015) Variazione del consumo energetico per il raffrescamento	Giornata tipica con ondata di calore (22/07/2015) Variazione del consumo energetico per il raffrescamento	Giornata tipica invernale (18/02/2015) Variazione del consumo energetico per il riscaldamento
RM1	-11.2%	-5.4%	-0.2%
RM2	-18.4%	-9.1%	1.5%

Per il calcolo dell'energia in ingresso ai generatori risparmiata a seguito dell'applicazione degli scenari di mitigazione RM1 e RM2, si moltiplica la variazione di energia utile per il riscaldamento invernale rispetto allo scenario base per il rendimento totale. Data l'impossibilità di sapere quale sia il tipo di caldaia utilizzata per il riscaldamento, sono stati considerati due scenari, ovvero il riscaldamento con caldaia tradizionale e con caldaia a condensazione (Tabella 72).

Tabella 72. Rendimenti dei sistemi di riscaldamento centralizzato a caldaia tradizionale e a condensazione

	Caldaia tradizionale	Caldaia a condensazione
Rendimento emissione	0.950	0.950
Rendimento regolazione	0.990	0.990
Rendimento distribuzione	0.990	0.990
Rendimento generazione (rispetto a energia utile)	0.900	1.040
Rendimento totale (rispetto a energia utile)	**0.838**	**0.968**

Invece, per il calcolo dell'energia in ingresso ai generatori in estate per il raffrescamento è stato ipotizzato l'utilizzo di sistemi autonomi a split i cui rendimenti sono riportati in Tabella 73.

Tabella 73. Rendimenti dei sistemi di raffrescamento autonomi a split

Rendimento emissione	0.970
Rendimento regolazione	0.980
Rendimento distribuzione	1.000
Rendimento generazione (rispetto a energia utile)	4.700
Rendimento totale (rispetto a energia utile)	**4.468**

I rendimenti totali sono stati utilizzati per il calcolo dei consumi energetici finali evitati (Tabella 74).

Tabella 74. Consumi energetici finali evitati

	Giornata tipica estiva (01/07/2015) Consumo energetico per il raffrescamento [kWh]	Giornata tipica con ondata di calore (22/07/2015) Consumo energetico per il raffrescamento [kWh]	Giornata tipica invernale (18/02/2015) Consumo energetico per il riscaldamento [kWh]
RM1- scenario base	-1501.73	-1402.40	-205.89
RM2- scenario base	-2458.84	-2362.57	1295.97
Scenario riscaldamento con caldaia tradizionale[1] (RM1-baseline)			-245.69
Scenario riscaldamento con caldaia tradizionale[1] (RM2-baseline)			1546.50
Scenario riscaldamento con caldaia a condensazione[1] (RM1-baseline)			-212.70
Scenario riscaldamento con caldaia a condensazione[1] (RM2-baseline)			1338.81
Scenario raffrescamento con split[2] (RM1-baseline)	-336.11	-313.88	
Scenario raffrescamento con split[2] (RM2-baseline)	-550.32	-528.77	

[1] Per il calcolo del consumo evitato, il fabbisogno termico evitato è stato diviso per i rendimenti totali degli impianti di riscaldamento
[2] Per il calcolo del fabbisogno termico evitato è stato diviso il consumo energetico evitato per il rendimento totale dei sistemi di raffrescamento autonomi a split

Infine, dividendo il consumo evitato di energia per il riscaldamento per il potere calorifico inferiore del metano (i.e., 9.94 kWh/m^3) è stata calcolata la quantità di metano evitata.
Di seguito è riportata una tabella riassuntiva dei consumi evitati per riscaldamento e raffrescamento a seconda del giorno tipico e dello scenario applicato.

Tabella 75. Consumi energetici finali evitati

	Giornata tipica estiva (01/07/2015) Consumo energetico per il raffrescamento [kWh]	Giornata tipica con ondata di calore (22/07/2015) Consumo energetico per il raffrescamento [kWh]	Giornata tipica invernale (18/02/2015) Consumo energetico per il riscaldamento [m^3]
Scenario riscaldamento con caldaia tradizionale[1] (RM1-baseline)			-24.72
Scenario riscaldamento con caldaia tradizionale[1] (RM2-baseline)			155.58
Scenario riscaldamento con caldaia a condensazione[1] (RM1-baseline)			-21.40
Scenario riscaldamento con caldaia a condensazione[1] (RM2-baseline)			134.69
Scenario raffrescamento con split[2] (RM1-baseline)	-336.11	-313.88	
Scenario raffrescamento con split[2] (RM2-baseline)	-550.32	-528.77	

10.5 Valutazione degli impatti evitati su temperatura locale e salute umana per le tre giornate tipo

Per la valutazione degli effetti sulla salute umana dell'applicazione delle strategie di mitigazione RM1 e RM2 per la città di Roma sono stati considerati tutti e tre i giorni tipo, ovvero il giorno tipico invernale, estivo e relativo all'ondata di calore.

Definita la metodologia da applicare e riportata nella sezione 9.2.3, i fattori di rischio relativi alla temperatura media giornaliera per le tre giornate tipo (i.e., estiva, con ondata di calore e invernale) sono stati recuperati dallo studio di Gasparrini et al. (2015) [54] (Figura 183).

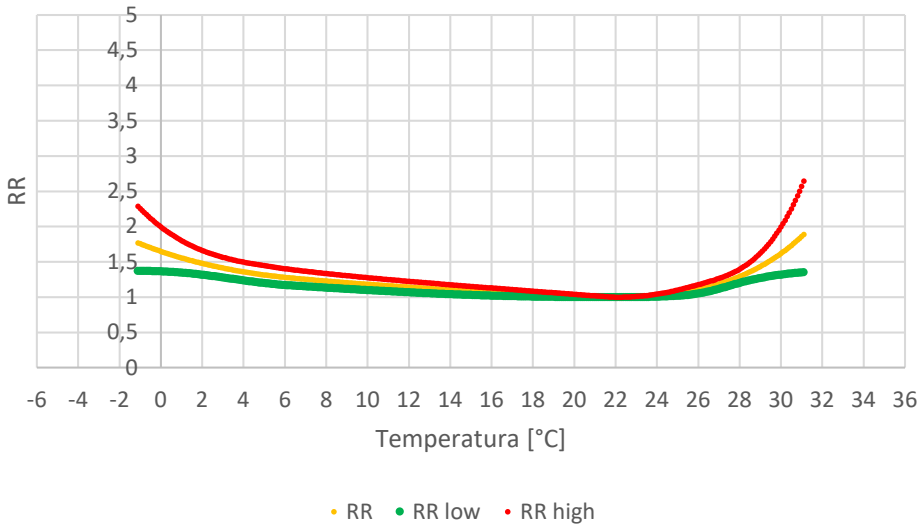


Figura 183. RR per la città di Roma al variare della temperatura dell'aria

La Figura 183 mostra come da temperature comprese tra 21.4 e 23 °C il RR sia pari ad uno. Ovvero, le temperature medie giornaliere comprese tra 21.4 e 23 °C sono considerate ideali, in quanto non provocano un aumento di mortalità da caldo o da freddo.

Per ciascuna giornata significativa sono stati richiesti al Comune i dati circa la mortalità per la città di Roma. I dati di mortalità sono stati suddivisi a seconda del sesso e della classe di età. Conoscendo il numero di morti N_{Morti} per un determinato giorno e conoscendo il RR relativo alla temperatura media del giorno considerato, utilizzando la seguente formula, è stato calcolato il numero di morti relative a cause naturali.

$$N_{Morti} = RR_{UHI} \cdot N$$

È stato calcolato il numero di abitanti per l'area urbana di via Lanciani. Per tale calcolo sono stati utilizzati i dati ISTAT [55] circa la superficie media per occupante delle abitazioni, che, per la città di Roma, è pari a 40.4 m^2/abitante. Conoscendo la superficie di ciascuno degli edifici nell'area di studio e il numero di piani di ciascun edificio, il numero di abitanti è stato così calcolato:

$$N_{Abitanti} = \sum_{i}^{n} Sperficie_{edificio} * (N_{Piani} - 1)/40.4$$

Il numero di abitanti per l'area urbana di via Lanciani risulta quindi essere pari a 1870. Mediante l'utilizzo di dati ISTAT, si è calcolata la percentuale della popolazione vivente nell'area urbana di via Lanciani, che corrisponde al 0.065% del totale del 2015 (i.e., 2872000 abitanti).

Successivamente, mediante i dati relativi all'aspettativa di vita per la città di Roma forniti da ISTAT [56] sono stati calcolati i DALY evitati relativi all'applicazione degli scenari di mitigazione applicando la seguente formula:

$$DALY = \Delta N \cdot \sum_i Perc_i \cdot Exp_i$$

10.5.1 Giornata tipica estiva

Durante la giornata estiva (i.e., 01/07/2015), secondo i dati del Comune di Roma, si sono avuti in tutta Roma 84 decessi. La temperatura media nell'area urbana di via Lanciani è di 25.8 °C che corrisponde ad un RR_{UHI} pari a 1.099. Di conseguenza N risulta essere pari a 76.43. Per lo scenario di mitigazione RM1 a cui corrisponde una temperatura media giornaliera pari a 25.7 °C e per lo scenario RM2 a cui corrisponde una temperatura media giornaliera pari a 25.6 °C, il numero di morti corrispondenti è stato calcolato considerando N pari a 76.43 e RR pari a 1.093 e 1.087 rispettivamente nel caso di RM1 e RM2 (Tabella 76).

Tabella 76. Mortalità e RR per gli scenari base, RM1 e RM2 relativi alla giornata tipica estiva (i.e., 01/07/2015)

	Temperatura media giornaliera	RR	RR_{min}	RR_{Max}	N_{Morti}	$N_{Morti\ min}$	$N_{Morti\ Max}$
Scenario base	25.8	1.099	1.093	1.087	84.00	79.41	88.86
RM1	25.7	1.039	1.035	1.031	83.55	79.09	88.26
RM2	25.6	1.163	1.155	1.147	83.12	78.81	87.67

La Tabella 77 mostra le morti evitate per effetto dell'applicazione degli scenari di mitigazione nell'intera città di Roma.

Tabella 77. Morti evitate nel giorno tipico estivo per applicazione degli scenari di mitigazione

	ΔN_{Morti}	$\Delta N_{Morti\ min}$	$\Delta N_{Morti\ Max}$
RM1-Scenario base	-0.45	-0.31	-0.60
RM2-Scenario base	-0.88	-0.60	-1.19

Per il calcolo dei DALY evitati nel giorno tipico estivo considerato per l'applicazione delle strategie di mitigazione è stata considerata la suddivisione delle morti per classi d'età relative allo scenario base e si è mantenuta la stessa suddivisione percentuale delle morti anche per quel che riguarda le temperature mitigate dato che gli scostamenti di temperatura media giornaliera sono pari a 0.1 e 0.2 °C per lo scenario RM2 e RM1 e pertanto sono molto limitati.

Tabella 78. Mortalità relativa al giorno tipico estivo, scenario base, suddivisa per classi d'età e aspettativa di vita per ciascuna classe

Classi di età	N_{Morti} F	% morti per classe d'età F	Aspettativa di vita F	N_{Morti} M	% morti per classe d'età M	Aspettativa di vita M
0-4	0	0.00%	85.137	1	2.38%	80.7
5-9	0	0.00%	80.378	0	0.00%	75.96
10-14	0	0.00%	75.4	0	0.00%	70.982
15-19	1	2.38%	70.424	0	0.00%	66.013
20-24	0	0.00%	65.469	0	0.00%	61.074
25-29	0	0.00%	60.508	0	0.00%	56.182
30-34	0	0.00%	55.562	0	0.00%	51.288
35-39	1	2.38%	50.624	0	0.00%	46.398
40-44	0	0.00%	45.732	1	2.38%	41.539
45-49	1	2.38%	40.874	3	7.14%	36.726
50-54	1	2.38%	36.073	0	0.00%	32.023
55-59	0	0.00%	31.341	3	7.14%	27.483
60-64	5	11.90%	26.737	0	0.00%	23.105
65-69	1	2.38%	22.294	2	4.76%	18.988

70-74	2	4.76%	18.046	5	11.90%	15.157
75-79	4	9.52%	14.065	11	26.19%	11.67
80-84	7	16.67%	10.419	8	19.05%	8.59
85-89	8	19.05%	7.265	4	9.52%	5.955
90-94	7	16.67%	4.911	4	9.52%	4.017
95-99	4	9.52%	3.355	0	0.00%	2.846
100-104	0	0.00%	2.222	0	0.00%	1.916
105-109	0	0.00%	1.472	0	0.00%	1.286
110-114	0	0.00%	1.024	0	0.00%	0.917
114-119	0	0.00%	0.772	0	0.00%	0.714
Totale	**42**	**100%**		**42**	**100%**	

Tuttavia, dato che gli scenari di mitigazione sono stati applicati ad un'area urbana limitata, sono state le calcolate le morti evitate riferite alla sola area di via Lanciani. Per fare ciò è stata valutata il potenziale numero di abitanti nell'area oggetto di studio.
Per il calcolo della mortalità evitata nell'area urbana di via Lanciani, si è moltiplicata la mortalità evitata per l'intera città di Roma per la percentuale di popolazione presente nell'area di via Lanciani (i.e., 0.065%). Risulta quindi quanto riportato in Tabella 79:

Tabella 79. Morti evitate nel giorno tipico estivo per applicazione degli scenari di mitigazione nell'area urbana di via Lanciani

	ΔN_{Morti}	$\Delta N_{Morti\ min}$	$\Delta N_{Morti\ Max}$
RM1-Scenario base	-0.000292	-0.000203	-0.000389
RM2-Scenario base	-0.000572	-0.000387	-0.000776

Mediante l'applicazione della relazione sopra diportata è stato calcolato per ciascuno scenario di mitigazione il numero di DALY evitati. Tali valori sono stati riportati in Tabella 80.

Tabella 80. DALY evitati per l'applicazione degli scenari di mitigazione nell'area urbana di via Lanciani

	DALY evitati	**DALY $_{min}$ evitati**	**DALY $_{Max}$ evitati**
RM1-Scenario base area urbana di via Lanciani	-0.004482	-0.003120	-0.005982
RM2-Scenario base area urbana di via Lanciani	-0.008787	-0.005946	-0.011922

10.5.2 Giornata tipica con ondata di calore

Durante la giornata tipica con ondata di calore (i.e., 22/07/2015), secondo i dati del Comune di Roma, si sono avuti in tutta Roma 120 decessi totali. La temperatura media nell'area urbana di via Lanciani è di 29.2 °C che corrisponde ad un RR_{UHI} pari a 1.468. Di conseguenza N risulta essere pari a 81.72. Per lo scenario di mitigazione RM1 a cui corrisponde una temperatura media giornaliera pari a 29.2 °C e per lo scenario RM2 a cui corrisponde una temperatura media giornaliera pari a 29.0 °C, il numero di morti corrispondenti è stato calcolato considerando N pari a 81.72 e RR pari a 1.468 e 1.435, rispettivamente nel caso di RM1 e RM2 (Tabella 81).

Tabella 81. Mortalità e RR per gli scenari base, RM1 e RM2 relativi alla giornata tipica con ondata di calore (i.e., 22/07/2015)

	Temperatura media giornaliera	**RR**	**RR_{min}**	**RR_{Max}**	**N_{Morti}**	**$N_{Morti\ min}$**	**$N_{Morti\ Max}$**
Scenario base	29.2	1.468	1.279	1.685	120.00	104.55	137.73
RM1	29.2	1.468	1.279	1.685	120.00	104.55	137.73
RM2	29.0	1.435	1.268	1.624	117.29	103.64	132.74

La Tabella 82 mostra le morti evitate per effetto dell'applicazione degli scenari di mitigazione nell'intera città di Roma durante una giornata tipica con ondata di calore.

Tabella 82. Morti evitate nel giorno tipico con ondata di calore per applicazione degli scenari di mitigazione

	ΔN_{Morti}	$\Delta N_{Morti\ min}$	$\Delta N_{Morti\ Max}$
RM1-Scenario base	0.00	0.00	0.00
RM2-Scenario base	-2.71	-0.91	-5.00

Per il calcolo dei DALY evitati nel giorno tipico con ondata di calore considerato per l'applicazione delle strategie di mitigazione è stata considerata la suddivisione delle morti per classi d'età relative allo scenario base e si è mantenuta la stessa suddivisione percentuale delle morti anche per quel che riguarda le temperature mitigate dato che lo scostamento di temperatura media giornaliera è pari a 0.2 °C per lo scenario RM2 e pari a zero per lo scenario RM1.

Tabella 83. Mortalità relativa al giorno tipico con ondata di calore, scenario base, suddivisa per classi d'età e aspettativa di vita per ciascuna classe

Classi di età	N_{Morti} F	% morti per classe d'età F	Aspettativa di vita F	N_{Morti} M	% morti per classe d'età M	Aspettativa di vita M
0-4	0	0.00%	85.137	0	0.00%	80.7
5-9	0	0.00%	80.378	0	0.00%	75.96
10-14	0	0.00%	75.4	0	0.00%	70.982
15-19	0	0.00%	70.424	0	0.00%	66.013
20-24	0	0.00%	65.469	0	0.00%	61.074
25-29	0	0.00%	60.508	0	0.00%	56.182
30-34	0	0.00%	55.562	0	0.00%	51.288
35-39	1	1.59%	50.624	1	1.75%	46.398
40-44	0	0.00%	45.732	0	0.00%	41.539
45-49	3	4.76%	40.874	0	0.00%	36.726
50-54	1	1.59%	36.073	0	0.00%	32.023
55-59	1	1.59%	31.341	1	1.75%	27.483
60-64	3	4.76%	26.737	1	1.75%	23.105
65-69	2	3.17%	22.294	3	5.26%	18.988
70-74	1	1.59%	18.046	7	12.28%	15.157
75-79	7	11.11%	14.065	10	17.54%	11.67
80-84	13	20.63%	10.419	12	21.05%	8.59
85-89	15	23.81%	7.265	12	21.05%	5.955
90-94	12	19.05%	4.911	7	12.28%	4.017
95-99	4	6.35%	3.355	3	5.26%	2.846
100-104	0	0.00%	2.222	0	0.00%	1.916
105-109	0	0.00%	1.472	0	0.00%	1.286
110-114	0	0.00%	1.024	0	0.00%	0.917
114-119	0	0.00%	0.772	0	0.00%	0.714
Totale	**63**	**100%**		**57**	**100%**	

Tuttavia, dato che gli scenari di mitigazione sono stati applicati ad un'area urbana limitata, sono state le calcolate le morti evitate riferite alla sola area di via Lanciani. Per fare ciò è stata valutato il potenziale numero di abitanti nell'area oggetto di studio.

Per il calcolo della mortalità evitata nell'area urbana di via Lanciani, si è moltiplicata la mortalità evitata per l'intera città di Roma per la percentuale di popolazione presente nell'area di via Lanciani (i.e., 0.065%). Risulta quindi quanto riportato in Tabella 84.

Tabella 84. Morti evitate nel giorno tipico con ondata di calore per applicazione degli scenari di mitigazione nell'area urbana di via Lanciani

	ΔN_{Morti}	$\Delta N_{Morti\ min}$	$\Delta N_{Morti\ Max}$
RM1-Scenario base	0.000000	0.000000	0.000000
RM2-Scenario base	-0.001762	-0.000590	-0.003249

Mediante l'applicazione della relazione sopra diportata è stato calcolato per ciascuno scenario di mitigazione il numero di DALY evitati. Tali valori sono stati riportati in Tabella 85.

Tabella 85. DALY evitati per l'applicazione degli scenari di mitigazione nell'area urbana di via Lanciani

	DALY evitati	**DALY $_{min}$ evitati**	**DALY $_{Max}$ evitati**
RM1-Scenario base area urbana di via Lanciani	0.000000	0.000000	0.000000
RM2-Scenario base area urbana di via Lanciani	-0.020356	-0.006821	-0.037541

10.5.3 Giornata tipica invernale

Durante la giornata tipica invernale (i.e., 18/02/2015), secondo i dati del Comune di Roma, si sono avuti in tutta Roma 85 decessi totali. La temperatura media nell'area urbana di via Lanciani è di 8.4 °C che corrisponde ad un RR_{UHI} pari a 1.221. Di conseguenza N risulta essere pari a 69.62. Per lo scenario di mitigazione RM1 a cui corrisponde una temperatura media giornaliera pari a 8.4 °C e per lo scenario RM2 a cui corrisponde una temperatura media giornaliera pari a 8.2 °C, il numero di morti corrispondenti è stato calcolato considerando N pari a 69.62 e RR pari a 1.221 e 1.226 rispettivamente nel caso di RM1 e RM2 (Tabella 86).

Tabella 86. Mortalità e RR per gli scenari base, RM1 e RM2 relativi alla giornata tipica invernale (i.e., 18/02/2015)

	Temperatura media giornaliera	**RR**	**RR_{min}**	**RR_{Max}**	**N_{Morti}**	**$N_{Morti\ min}$**	**$N_{Morti\ Max}$**
Scenario base	8.4	1.221	1.126	1.324	85.00	78.39	92.17
RM1	8.4	1.221	1.126	1.324	85.00	78.39	92.17
RM2	8.2	1.226	1.129	1.330	85.33	78.64	92.60

La Tabella 87 mostra le morti evitate per effetto dell'applicazione degli scenari di mitigazione nell'intera città di Roma durante una giornata tipica invernale.

Tabella 87. Morti evitate nel giorno tipico invernale per applicazione degli scenari di mitigazione

	ΔN_{Morti}	$\Delta N_{Morti\ min}$	$\Delta N_{Morti\ Max}$
RM1-Scenario base	0.00	0.00	0.00
RM2-Scenario base	0.33	0.25	0.43

Per il calcolo dei DALY evitati nel giorno tipico invernale considerato per l'applicazione delle strategie di mitigazione è stata considerata la suddivisione delle morti per classi d'età relative allo scenario base e si è mantenuta la stessa suddivisione percentuale delle morti anche per quel che riguarda le temperature mitigate dato che lo scostamento di temperatura media giornaliera è pari a 0.2 °C per lo scenario RM2 e pari a zero per lo scenario RM1.

Tabella 88. Mortalità relativa al giorno tipico invernale, scenario base, suddivisa per classi d'età e aspettativa di vita per ciascuna classe

Classi di età	N_{Morti} F	% morti per classe d'età F	Aspettativa di vita F	N_{Morti} M	% morti per classe d'età M	Aspettativa di vita M
0-4	0	0.00%	85.137	0	0.00%	80.7
5-9	0	0.00%	80.378	0	0.00%	75.96
10-14	0	0.00%	75.4	0	0.00%	70.982
15-19	0	0.00%	70.424	0	0.00%	66.013
20-24	0	0.00%	65.469	0	0.00%	61.074
25-29	0	0.00%	60.508	0	0.00%	56.182
30-34	0	0.00%	55.562	0	0.00%	51.288
35-39	0	0.00%	50.624	0	0.00%	46.398
40-44	2	3.92%	45.732	0	0.00%	41.539
45-49	0	0.00%	40.874	0	0.00%	36.726
50-54	1	1.96%	36.073	0	0.00%	32.023
55-59	0	0.00%	31.341	1	2.94%	27.483
60-64	1	1.96%	26.737	2	5.88%	23.105
65-69	2	3.92%	22.294	3	8.82%	18.988
70-74	2	3.92%	18.046	5	14.71%	15.157
75-79	10	19.61%	14.065	6	17.65%	11.67
80-84	5	9.80%	10.419	9	26.47%	8.59
85-89	12	23.53%	7.265	2	5.88%	5.955
90-94	11	21.57%	4.911	5	14.71%	4.017
95-99	4	7.84%	3.355	1	2.94%	2.846
100-104	1	1.96%	2.222	0	0.00%	1.916
105-109	0	0.00%	1.472	0	0.00%	1.286
110-114	0	0.00%	1.024	0	0.00%	0.917
114-119	0	0.00%	0.772	0	0.00%	0.714
Totale	**51**	**100%**		**34**	**100%**	

Tuttavia, dato che gli scenari di mitigazione sono stati applicati ad un'area urbana limitata, sono state le calcolate le morti evitate riferite alla sola area di via Lanciani. Per fare ciò è stata valutata il potenziale numero di abitanti nell'area oggetto di studio.
Per il calcolo della mortalità evitata nell'area urbana di via Lanciani, si è moltiplicata la mortalità evitata per l'intera città di Roma per la percentuale di popolazione presente nell'area di via Lanciani (i.e., 0.065%). Risulta quindi quanto riportato in Tabella 89.

Tabella 89. Morti evitate nel giorno tipico invernale per applicazione degli scenari di mitigazione nell'area urbana di via Lanciani

	ΔN_{Morti}	$\Delta N_{Morti\ min}$	$\Delta N_{Morti\ Max}$
RM1-Scenario base	0.000000	0.000000	0.000000
RM2-Scenario base	0.000216	0.000161	0.000278

Mediante l'applicazione della relazione sopra diportata è stato calcolato per ciascuno scenario di mitigazione il numero di DALY evitati. Tali valori sono stati riportati in Tabella 90:

Tabella 90. DALY evitati per l'applicazione degli scenari di mitigazione nell'area urbana di via Lanciani

	DALY evitati	DALY $_{min}$ evitati	DALY $_{Max}$ evitati
RM1-Scenario base area urbana di via Lanciani	0.000000	0.000000	0.000000
RM2-Scenario base area urbana di via Lanciani	0.002467	0.001848	0.003178

10.6 Valutazione dell'impatto della mitigazione delle temperature rispetto agli impatti degli scenari di mitigazione

Sono stati dunque riportati i danni finali (i.e., *endpoint*) relativi all'applicazione delle strategie di mitigazione RM1 e RM2 calcolati col metodo ReCiPe2016 prospettiva gerarchica e per l'orizzonte temporale di 50 anni (Tabella 91), e quelli relativi a quantità unitarie di metano e corrente elettrica rispettivamente per il riscaldamento e il raffrescamento degli edifici (Tabella 92 e Tabella 93).

Tabella 91. Danni endpoint relativi allo scenario RM1 ed RM2 e all'orizzonte temporale di 50 anni

Categoria di danno	Unità	Scenario RM1	Scenario RM2
Human health	DALY	0.642885	0.959296
Ecosystems	Species * yr	0.001747	0.002922
Resources	USD2013	21626.78	-23826.2

Tabella 92. Danni endpoint di 1m^3 di metano

Categoria di danno	Unità	
Human health	DALY	5.6E-06
Ecosystems	Species * yr	1.18E-07
Resources	USD2013	0.060162

Tabella 93. Danni endpoint 1kWh corrente elettrica a basso voltaggio considerando il mix energetico italiano

Categoria di danno	Unità	
Human health	DALY	8.96012E-07
Ecosystems	Species * yr	3.36117E-09
Resources	USD2013	0.038526611

I danni calcolati sono stati scalati in modo da spalmarli su un singolo giorno. Per fare ciò i danni calcolati per 50 anni sono prima ricalcolati per un singolo anno, dividendo i danni totali per 50, e poi per il singolo giorno dividendo i danni relativi ad un anno per 365 (Tabella 94). Nella Tabella 94 sono stati anche riportati i danni alla salute umana evitati relativi al giorno tipico estivo, al giorno tipico con ondata di calore e al giorno tipico invernale.

Tabella 94. Danni endpoint relativi allo scenario RM1 ed RM2 e attribuibili ad un solo giorno

Categoria di danno		Unità	Scenario RM1	Scenario RM2
Human health		DALY	$3.5*10^{-5}$	$5.25*10^{-5}$
Ecosystems		Species * yr	$9.57*10^{-8}$	$1.60*10^{-7}$
Resources		USD2013	1.19	-1.30
Human Health (mitigazione temperature tipico estivo)	**delle giorno**	DALY	-0.0045 (±0.0015)	-0.009 (±0.003)
Human Health (mitigazione	**delle**	DALY	0.0000 (±0.0000)	-0.020 (±0.0016)

temperature giorno tipico con ondata di calore)			
Human Health (mitigazione delle temperature giorno tipico invernale)	DALY	0.0000 (±0.0000)	-0.0025 (±0.0007)

Infine, in Figura 184 sono stati riportati i danni *endpoint* alla salute umana calcolati con SimaPro metodo ReCiPe 2016 e relativi sia agli scenari (i.e., RM1 e RM2) sia gli impatti relativi al ciclo di vita degli scenari di mitigazione e riportati ad un solo giorno. La Figura 184 mostra che i danni relativi a tutte le fasi di vita relative agli scenari RM1 e RM2 e relativi ad un solo giorno di vita utile sono estremamente esigui se paragonati ai benefici che l'installazione degli stessi hanno sulla salute umana. Inoltre, è possibile notare che gli impatti evitati relativi all'applicazione dello scenario RM2 sono superiori rispetto a quelli relativi allo scenario RM1. Inoltre, in termini assoluti, gli impatti relativi agli scenari di mitigazione sono di due ordini di grandezza inferiori rispetto ai benefici sulla salute umana escludendo i casi in cui i benefici sulla salute umana sono nulli. La Tabella 95 mostra invece gli impatti relativi sia agli scenari di mitigazione, sia agli effetti che queste hanno sulla salute umana e il consumo energetico degli edifici nei giorni tipici, e ad una singola giornata. È possibile notare come gli impatti evitati relativi ai risparmi energetici siano predominanti rispetto agli impatti evitati sulla salute umana ma soprattutto agli impatti relativi al ciclo di vita degli scenari di mitigazione. Quest'ultimo dato conferma l'assoluta convenienza dal punto di vista ambientale dell'installazione dei due scenari di mitigazione.

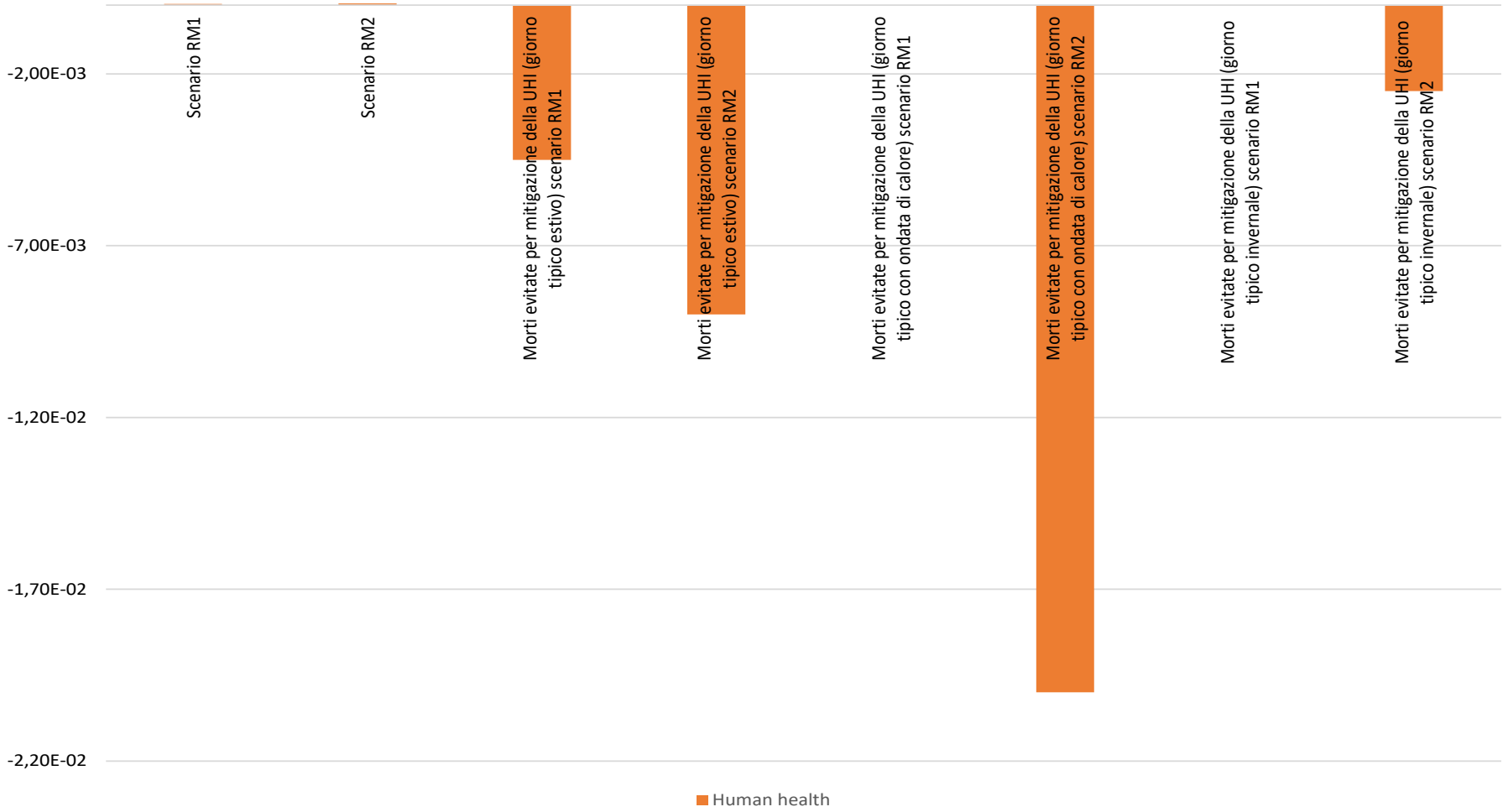


Figura 184. Danni *endpoint* alla salute umana relativi all'applicazione degli scenari di mitigazione RM1 e RM2 ad un orizzonte temporale di un giorno

Tabella 95. Danni relativi all'applicazione degli scenari di mitigazione RM1 e RM2 e relativi agli effetti su salute umana e consumo energetico degli edifici riferiti ad una sola giornata

	Human health	Ecosystems	Resources
Scenario RM1	3.52 E-05	9.57 E-08	1.19
Scenario RM2	5.26 E-05	1.60 E-07	-1.31
Morti evitate per mitigazione della UHI (giorno tipico estivo) scenario RM1	-0.45 E-02		
Morti evitate per mitigazione della UHI (giorno tipico estivo) scenario RM2	-0.9 E-02		
Morti evitate per mitigazione della UHI (giorno tipico con ondata di calore) scenario RM1	0		
Morti evitate per mitigazione della UHI (giorno tipico con ondata di calore) scenario RM2	-0.02		
Morti evitate per mitigazione della UHI (giorno tipico invernale) scenario RM1	0		
Morti evitate per mitigazione della UHI (giorno tipico invernale) scenario RM2	-0.25 E-02		
Caldaia tradizionale scenario RM1	1.38 E-04	-2.92 E-06	-1.49 E+00
Caldaia tradizionale scenario RM2	8.71 E-04	1.84 E-05	9.36 E+00
Caldaia a condensazione scenario RM1	-1.20 E-04	-2.53 E-06	-1.29 E+00
Caldaia a condensazione scenario RM2	7.54 E-04	1.59 E-05	8.10 E+00
Raffrescamento giorno tipico estivo scenario RM1	-3.01 6E-04	-1.13 E-06	-1.29 E+01
Raffrescamento giorno tipico estivo scenario RM2	-4.93 E-04	-1.85 E-06	-2.12 E+01
Raffrescamento giorno tipico ondata di calore scenario RM1	-2.81 E-04	-1.06 E-06	-1.21 E+01
Raffrescamento giorno tipico ondata di calore scenario RM2	-4.74 E-04	-1.78 E-06	-2.04 E+01

Di seguito sono riportati i grafici dei danni relativi ai consumi energetici degli edifici nell'area di studio suddivisi per categoria di danno (Figura 185-Figura 187).

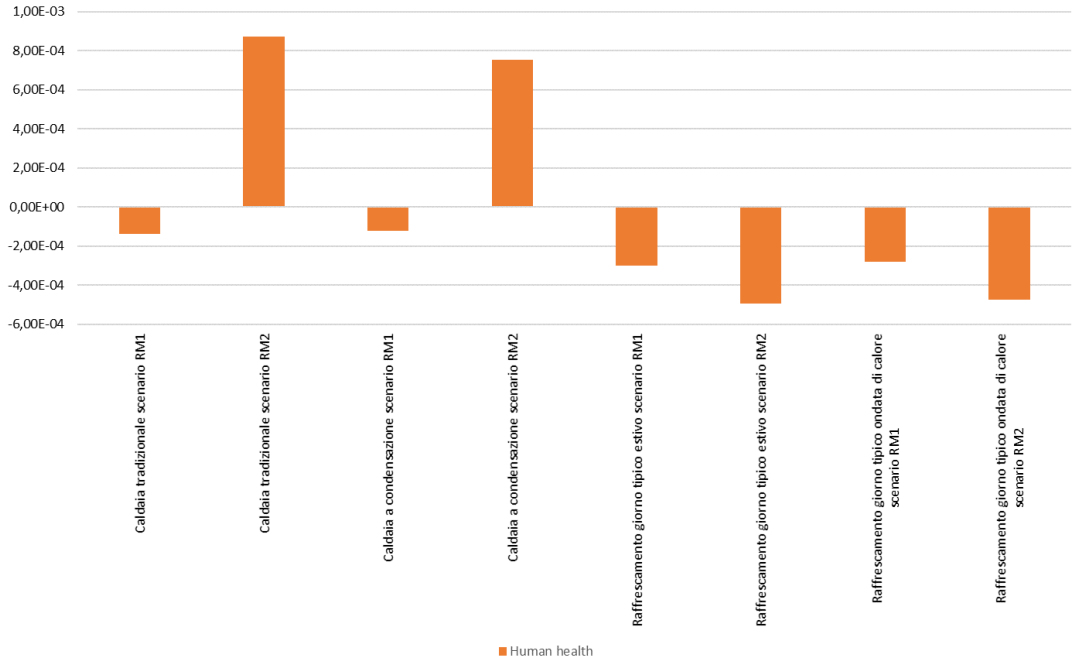


Figura 185. Danni sulla salute umana relativi alla variazione dei consumi energetici degli edifici per l'applicazione degli scenari di mitigazione RM1 e RM2

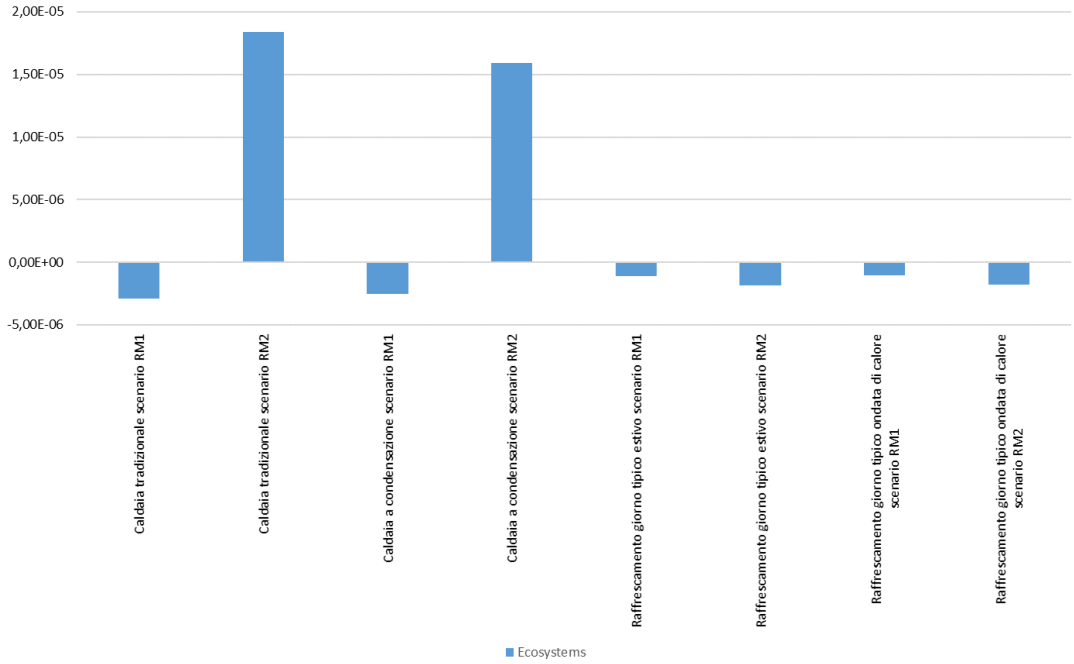


Figura 186. Danni sugli ecosistemi relativi alla variazione dei consumi energetici degli edifici per l'applicazione degli scenari di mitigazione RM1 e RM2

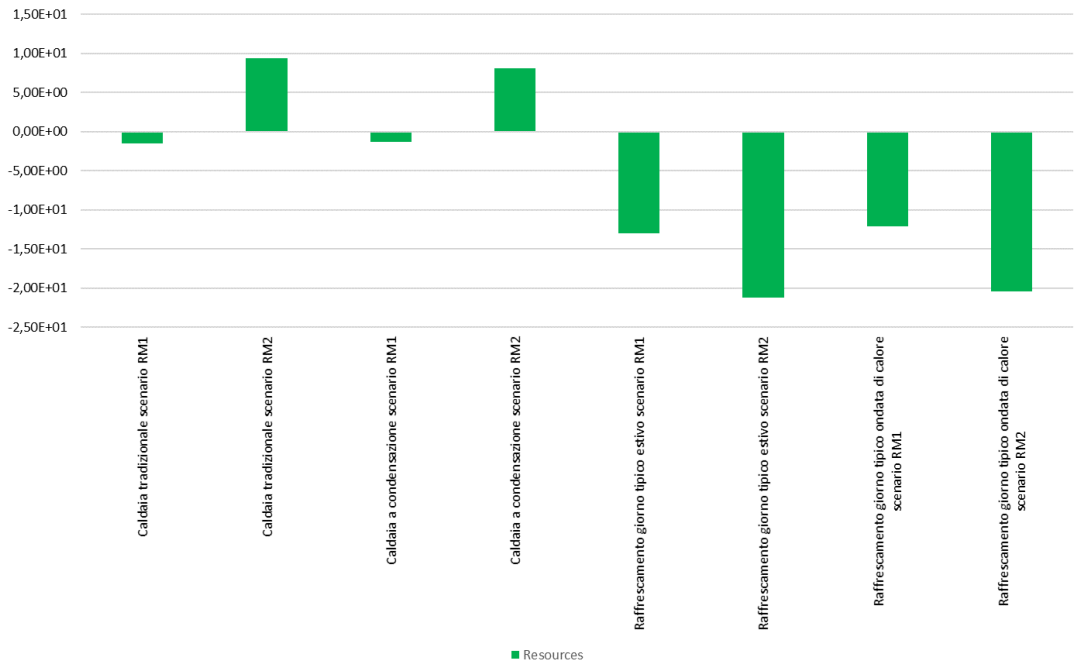


Figura 187. Danni sulle risorse relativi alla variazione dei consumi energetici degli edifici per l'applicazione degli scenari di mitigazione RM1 e RM2

È possibile notare che lo scenario di mitigazione RM2 determina un aumento dei consumi energetici degli edifici in inverno che, di conseguenza, danno origine a impatti negativi in tutte le categorie di danno. Lo stesso scenario da origine, invece, ad impatti evitati sia in giornate tipiche estive sia in giornate con ondata di calore. Al contrario, lo scenario RM1 genera impatti evitati sia in inverno sia in estate. Pertanto, quest'ultimo scenario risulta essere ambientalmente preferibile al primo.

11 Conclusioni

Durante la terza annualità del PTR 2019-2021 si è proceduto, mediante l'uso del *software* ENVI-met, alla simulazione delle interazioni tra ambiente costruito e clima locale per le tre aree urbane selezionate e modellate durante la seconda annualità e considerando tre giornate tipiche: una estiva, una con ondata di calore e una invernale.
Inoltre, sono state reperite le serie meteorologiche storiche relative alle temperature urbane e rurali per le città in questione: Roma, Torino e Milano. Tali serie storiche sono state utilizzate per la definizione della magnitudo dell'isola di calore urbana delle tre città.
Mediante l'uso del *software* ENVI-met sono state simulate le interazioni tra ambiente costruito e clima locale a seguito dell'applicazione di tre scenari di mitigazione per ciascuna città.
Per l'area urbana nella città di Roma è risultato che per tutte le tre giornate tipiche:
- l'applicazione isolata di pareti verdi su un solo edificio (i.e., scenario RM3) ha effetti poco significativi sulla mitigazione dell'isola di calore urbana;
- l'effetto dell'installazione dei tetti verdi estensivi (i.e., scenario RM1) è molto limitato a causa della distanza tra i solai di copertura degli edifici (i.e., a 20 m dal piano stradale) e la quota stradale;
- la maggiore mitigazione è raggiunta quando vengono installati in modo combinato tetti verdi e facciate verdi (i.e., scenario RM2). Tali risultati vanno però maggiormente riferiti all'applicazione di facciate verdi.

Per l'area urbana di Torino, è risultato che:
- le applicazioni di *living wall* e di *green façade* in un *canyon* urbano parallelo alla direzione principale del vento hanno effetti pressoché simili e comportano una riduzione della temperatura media dell'aria su tutta l'area circostante, con relativa riduzione dell'UHI;
- l'applicazione di un *living wall* in un *canyon* urbano ortogonale alla direzione principale del vento comporta una riduzione dell'isola di calore; tale mitigazione è maggiore in inverno e minore in corrispondenza di giornate calde (i.e., in estate e durante ondate di calore);
- l'applicazione di strategie verdi di involucro in un *canyon* parallelo al vento risulta essere maggiormente efficace nel mitigare le temperature dell'aria in corrispondenza di giornate calde (i.e., in estate e durante ondate di calore) che in inverno;
- confrontando l'applicazione di un *living wall* in *canyon* parallelo e in *canyon* ortogonale alla direzione principale del vento, l'applicazione in *canyon* parallelo è più efficace in giornate calde (i.e., in estate e durante ondate di calore). In inverno l'effetto di mitigazione dell'isola di calore è invece simile per entrambe le applicazioni.

Lo studio degli scenari del caso di Milano ha mostrato che:
- nel caso di giornate calde (i.e., giornata tipica estiva e ondata di calore), i risultati più apprezzabili in termini di riduzione dell'isola di calore si realizzano con l'installazione di *living wall* su un *canyon* urbano continuo e di larghezza ridotta;
- gli effetti più importanti appaiono dovuti alla combinazione di nuove realizzazioni verdi con elementi di contesto urbano, quali la presenza di aree chiuse (cortili), la presenza di verde urbano preesistente e la direzione del vento;
- nella giornata invernale la realizzazione di pareti verdi non incide sulla riduzione dell'isola di calore urbana. Nel caso di grande concentrazione di verde (combinazione di pareti verdi in un *canyon* urbano con adiacente tetto verde, i.e. MI3), si può osservare un innalzamento della temperatura media dell'aria nell'area considerata. Questo fenomeno si può osservare, in maniera ridotta, anche in qualche ora notturna delle giornate calde.

Per ciò che invece concerne gli effetti dell'applicazione degli scenari di mitigazione sulla concentrazione di biossido di carbonio, è risultato che per nessuno degli scenari applicati, per nessuna delle giornate tipiche e per nessuna delle tre aree urbane, l'applicazione di tetti e facciate verdi è in grado di mitigare in modo efficace la concentrazione di CO_2, a meno di situazioni puntuali legate a specifiche conformazioni urbane (i.e. aree chiuse come cortili) e distribuzione del vento.
In generale:
Gli scenari applicati all'area urbana selezionata di Roma hanno mostrato che:

- l'applicazione di facciate verdi isolate non contribuisce in modo significativo alla mitigazione dell'isola di calore urbana. Pertanto, politiche urbane che mirano alla riduzione delle temperature locali dovrebbero promuoverne l'applicazione sistematica;
- i tetti verdi estensivi, se pur applicati all'intera area di studio, si sono rivelati solo parzialmente efficaci nel mitigare la UHI. Il maggior limite, in questo caso, è rappresentato dall'altezza degli edifici sui quali questi vengono installati. Pertanto, politiche urbane che mirano ad un'efficace mitigazione delle UHI dovrebbero considerare le altezze degli edifici e promuovere la loro installazione maggiormente su edifici di altezze più limitate;
- dal confronto tra gli scenari RM2 e RM3 risulta evidente l'importanza del fattore di scala. Ovvero, una più estesa applicazione delle strategie verdi di involucro è in grado di essere maggiormente efficace nel diminuire le temperature locali;
- le strategie verdi di involucro risultano essere maggiormente efficaci nel mitigare le temperature dell'aria in corrispondenza di giornate calde (i.e., in estate e durante ondate di calore) che in inverno quando l'attività biologica delle specie verdi è notevolmente ridotta e quando la radiazione solare incidente è inferiore;

Gli scenari applicati all'area urbana selezionata di Torino hanno mostrato che:
- in presenza di *canyon* urbano, l'applicazione di *green wall* comporta una riduzione della temperatura media dell'aria su tutta l'area circostante, e l'effetto è simile per entrambe le tipologie di parete verde considerate. Pertanto, politiche urbane che mirano ad un'efficace mitigazione delle UHI, possono promuovere l'applicazione generica di pareti verdi;
- in tutti i casi, l'effetto di mitigazione è particolarmente rilevante all'interno del *canyon* di installazione, ed è indipendente dal tipo di parete verde adottata; durante le giornate calde (i.e., in estate e durante ondate di calore) la mitigazione all'interno del *canyon* è maggiore quando quest'ultimo è parallelo alla direzione principale del vento; in inverno, la mitigazione all'interno del *canyon* è maggiore quando quest'ultimo è perpendicolare alla direzione principale del vento. Pertanto, politiche urbane che mirano alla riduzione delle temperature locali dovrebbero considerare l'orientamento del *canyon* urbano di installazione a seconda della stagione in cui si ha l'obiettivo di ottenere la maggiore riduzione di temperatura.

Gli scenari applicati all'area urbana selezionata di Milano hanno mostrato che:
- l'applicazione di *living wall* in un *canyon* urbano pressoché parallelo alla direzione principale del vento comporta una riduzione della temperatura media dell'aria su tutta l'area circostante, con relativa riduzione dell'UHI. Questo effetto di mitigazione può essere esteso a zone circostanti l'area di installazione del verde attraverso l'azione del vento. Inoltre, l'adozione di pareti verdi si somma all'effetto mitigativo di verde urbano preesistente amplificandolo;
- gli effetti sulla temperatura dell'aria sono più evidenti sia nel caso di *canyon* urbani di ridotte dimensioni (i.e., 14 m di larghezza) e con ridotta soluzione di continuità degli edifici costituenti il *canyon*, sia nel caso di maggiore densità di verde (i.e., installazione contestuale di pareti verdi su *canyon* e tetto verde sulla stessa strada). Da qui l'indicazione per i decisori urbani della prioritizzazione dell'installazione di *living wall* in *canyon* urbani di dimensioni ridotte piuttosto che in *canyon* urbani ampi, per favorire l'efficacia degli impatti della soluzione verde, oltre l'importanza dell'installazione combinata di pareti verdi e tetti verdi, quando questi ultimi sono installati su edifici bassi;
- ai fini della valutazione delle condizioni di isola di calore, è utile considerare la progettazione di sistemi verdi anche in funzione di particolari conformazioni urbane, quali corti e cortili e dell'esistenza di verde urbano preesistente.

Inoltre, per tutte e tre le aree urbane considerate, indipendentemente dalle condizioni meteorologiche, l'applicazione degli scenari di mitigazione dell'UHI ha effetto nullo sulla concentrazione di CO_2 nell'aria. Al contrario, la presenza di alberature stradali mostra come queste siano efficaci nel mitigare la concentrazione di biossido di carbonio. Pertanto, i decisori urbani che mirano alla mitigazione della CO_2 nelle città devono focalizzare i propri sforzi nell'aumentare la vegetazione urbana piuttosto che puntare su soluzioni verdi d'involucro.

Nel corso della terza annualità è stato valutato l'effetto degli scenari di mitigazione sull'uso di energia degli edifici utilizzando un modello semplificato basato sulla norma UNI EN 13790:2008. Per ciascuna città, Torino, Milano e Roma, è stato considerato un singolo edificio, rappresentativo di gran parte del parco edilizio della città stessa (i.e., archetipo), definito nel corso della seconda annualità del PTR 2019-2021. È stata quindi simulata la prestazione energetica di tali edifici a partire da una situazione *baseline*, e poi in seguito all'applicazione degli scenari di mitigazione oggetto di simulazione con ENVI-met; l'applicazione degli scenari è stata implementata nel modello sia in termini di modifica delle caratteristiche termofisiche degli edifici, sia in termini di variazione dei valori di temperatura dell'aria esterna. Per la valutazione energetica sono stati considerati i valori del carico sensibile di riscaldamento e di raffrescamento, in termini di energia termica utile, forniti dal modello. A tali valori sono poi stati associati i rendimenti impiantistici per ottenere l'energia termica totale in ingresso ai generatori. Per gli scenari di mitigazione che prevedevano l'applicazione di pareti verdi in un *canyon* urbano (i.e., TO1, TO2, TO3, MI1, MI2, MI3), è stata valutata l'applicazione dell'involucro verde sulla sola parete rivolta verso il *canyon*, considerando l'archetipo di edificio collocato prima su un lato e poi sull'altro del *canyon* stesso: Est oppure Ovest per gli scenari TO1, TO2, MI1, MI2, MI3, e infine Nord oppure Sud per lo scenario TO3.

Considerando gli scenari applicati a Roma, è possibile affermare che, in termini di energia utile, le prestazioni migliori si ottengono con l'applicazione estensiva di *green roof*, e che l'applicazione estensiva contemporanea di *green roof* e di *green façade* comporta comunque una riduzione dell'energia totale. L'applicazione di una *green façade* su un edificio singolo vede invece aumentare il fabbisogno di energia utile totale. La situazione si modifica invece in termini di energia in ingresso ai generatori. In tal caso l'applicazione estensiva dei *green roof* comporta una riduzione dell'energia totale, ma la presenza di *green façade*, sia su edificio singolo sia associata in modo estensivo ai *green roof*, comporta degli svantaggi invernali che non riescono ad essere compensati dai vantaggi estivi.

Considerando gli scenari applicati a Torino, è possibile affermare che le prestazioni migliori si ottengono con un *living wall* in un *canyon* parallelo alla direzione del vento (TO1-E, TO1-W) rispetto ad un *canyon* perpendicolare al vento (TO3-N, TO3-S). Le installazioni ad Est e a Sud forniscono prestazioni estive moderatamente migliori rispetto, rispettivamente, all'Ovest e al Nord; mentre le prestazioni invernali e totali di fatto non risentono del lato del *canyon* su cui il *living wall* è installato. L'installazione di una *green façade* migliora le prestazioni estive, con l'installazione ad Est che si comporta meglio di quella ad Ovest, ma peggiora sia le prestazioni invernali sia quelle totali rispetto allo scenario base.

Considerando gli scenari applicati a Milano, è possibile affermare che le prestazioni migliori si ottengono con un *living wall* in un *canyon* urbano di dimensioni compatte (i.e., di larghezza fino a 14 m); l'installazione di *living wall* su *canyon* di dimensioni più grandi risulta essere maggiormente efficace se associato alla presenza di un *green roof* in un edificio contiguo. L'installazione ad Est fornisce prestazioni sia estive sia totali migliori rispetto all'Ovest; mentre per le prestazioni invernali, un'installazione a Ovest è moderatamente più vantaggiosa.

Inoltre, durante quest'ultima annualità, è stato sviluppato un fattore di caratterizzazione *midpoint* per poter inserire nelle logiche LCA, e in particolare del metodo ReCiPe2016 secondo l'approccio B, l'effetto che l'applicazione di pareti verdi ha sul clima in aree urbane con densità compresa tra 0.33 e 0.37 in area climatica Csa. Il fattore di caratterizzazione è di fatto una relazione matematica sintetica in grado di restituire in modo rapido e senza bisogno di grandi quantità di dati di *input* e di particolari *expertise* l'effetto, in termini di variazione di temperatura, che l'installazione di pareti verdi ha sul clima urbano. Inoltre, si è proceduto ad applicare un fattore di caratterizzazione *endpoint* in grado di quantificare gli effetti della variazione della temperatura urbana sulla salute umana, in termini di DALY, a due casi di studio relativi all'area urbana selezionata di Roma (i.e., RM1 e RM2). In questo secondo caso si è utilizzato l'approccio A sviluppato durante la prima annualità del PTR 2019-2021.

I fattori di caratterizzazione *midpoint* ed *endpoint* sono stati applicati ad un totale di tre casi di studio. Infine, sono stati calcolati gli impatti relativi all'applicazione degli scenari di mitigazione RM1 e RM2 e delle conseguenti variazioni di uso di energia degli edifici e di temperatura locale relativi alle tre giornate significative. È risultato che i danni relativi all'applicazione degli scenari RM1 e RM2 sono esigui rispetto ai danni evitati relativi sia agli effetti della mitigazione dell'isola di calore urbana sulla salute umana, sia agli effetti che gli scenari stessi hanno

sulla variazione di fabbisogno energetico degli edifici. Tuttavia, i danni relativi all'applicazione dello scenario RM2 sono maggiori rispetto a quelli relativi allo scenario RM1, ciò è addebitabile al fatto che l'installazione di pareti verdi ha un effetto negativo sui consumi energetici invernali degli edifici poiché la specie vegetale utilizzata nel progetto, ovvero una specie sempreverde, limita i guadagni solari durante la stagione fredda.

È importante, tuttavia, sottolineare che gli impatti relativi all'applicazione degli scenari di mitigazione sono di due ordini di grandezza inferiori rispetto ai benefici che gli stessi hanno sulla salute umana. Questo risultato indica che quando la metodologia LCA viene applicata all'ambiente costruito secondo l'approccio tradizionale, che non include l'interazione tra ambiente costruito e clima urbano, vengono omessi impatti potenzialmente importati. Pertanto, il progresso metodologico offerto dal presente studio è da considerarsi rilevante perché consente di quantificare danni che verrebbero altrimenti ignorati.

Parte del lavoro di ricerca condotto durante la terza annualità di RdS è stato organizzato in forma di due articoli che a breve verranno inviati a riviste scientifiche per la loro pubblicazione. Invece, un altro articolo scientifico (i.e., [57]) frutto dell'attività di ricerca del primo e del secondo anno è stato pubblicato su rivista scientifica internazionale.

12 Appendice

Tabella 96. Caratterizzazione del processo "Seedlings at greenhouse, EU"

Categoria d'impatto	Unità	Totale	Seedlings, at greenhouse, EU	Electricity, low voltage {RER}| market group for | APOS, U	Gasoline, combusted in equipment/EU	Nitrogen fertilizer, production mix, at plant/US	Phosphorous fertilizer, production mix, at plant/US	Dummy_Potassium fertilizer, production mix, at plant/kg/RNA
Global warming, Human health	DALY	3.41E-08	0	1.65918E-08	1.73519E-08	8.14342E-11	2.69286E-11	0
Global warming, Terrestrial ecosystems	species.yr	1.03E-10	0	5.00659E-11	5.23519E-11	2.45427E-13	8.12403E-14	0
Global warming, Freshwater ecosystems	species.yr	2.81E-15	0	1.36765E-15	1.43025E-15	6.70629E-18	2.21942E-18	0
Stratospheric ozone depletion	DALY	9.07E-12	0	5.40773E-12	2.88815E-12	7.72241E-13	7.49256E-16	0
Ionizing radiation	DALY	7.73E-11	0	7.69386E-11	3.32E-13	0	0	0
Ozone formation, Human health	DALY	2.39E-10	0	3.12449E-11	2.07739E-10	3.74304E-14	1.14732E-13	0
Fine particulate matter formation	DALY	3.86E-08	0	1.81833E-08	2.00764E-08	1.49333E-10	2.3816E-10	0
Ozone formation, Terrestrial ecosystems	species.yr	3.4E-11	0	4.47334E-12	2.95396E-11	5.37699E-15	1.64851E-14	0
Terrestrial acidification	species.yr	3.81E-11	0	1.5293E-11	2.23447E-11	1.77912E-13	2.76872E-13	0
Freshwater eutrophication	species.yr	1.32E-11	0	1.2161E-11	1.13998E-14	0	1.06166E-12	0
Marine eutrophication	species.yr	2.41E-15	0	2.26538E-15	1.4054E-16	7.28899E-19	1.62058E-19	0

Terrestrial ecotoxicity	species.yr	6.15E-13	0	5.50079E-13	6.41722E-14	4.18039E-17	1.12224E-15	0
Freshwater ecotoxicity	species.yr	1.41E-12	0	1.41064E-12	7.6301E-16	1.96934E-16	3.35176E-16	0
Marine ecotoxicity	species.yr	2.73E-13	0	2.70855E-13	2.41796E-15	3.77904E-17	7.15379E-17	0
Human carcinogenic toxicity	DALY	4.07E-09	0	4.03806E-09	3.18306E-11	4.95745E-14	2.58769E-12	0
Human non-carcinogenic toxicity	DALY	6.82E-09	0	6.7061E-09	6.56895E-11	2.63339E-12	4.56285E-11	0
Land use	species.yr	3.85E-11	0	3.8467E-11	0	0	0	0
Mineral resource scarcity	USD2013	1.03E-05	0	1.01125E-05	1.79854E-07	0	0	0
Fossil resource scarcity	USD2013	0.004178	0	0.000857512	0.003303905	1.35419E-05	3.06733E-06	0
Water consumption, Human health	DALY	1.06E-08	1.03E-08	3.03344E-10	6.5797E-13	0	0	0
Water consumption, Terrestrial ecosystem	species.yr	6.42E-11	6.26E-11	1.56861E-12	4.00117E-15	0	0	0
Water consumption, Aquatic ecosystems	species.yr	2.89E-15	2.8E-15	8.33541E-17	1.79015E-19	0	0	0

Tabella 97 Normalizzazione del processo “Seedlings at greenhouse, EU”

Categoria di danno	Unità	Totale	Seedlings, at greenhouse, EU	Electricity, low voltage {RER}| market group for | APOS, U	Gasoline, combusted in equipment/EU	Nitrogen fertilizer, production mix, at plant/US	Phosphorous fertilizer, production mix, at plant/US	Dummy_Potassium fertilizer, production mix, at plant/kg/RNA
Human health		3.98E-06	4.34E-07	1.93391E-06	1.59E-06	9.86E-09	1.3195E-08	0
Ecosystems		4.09E-07	8.74E-08	1.73473E-07	1.46E-07	5.99E-10	2.00716E-09	0
Resources		1.5E-07	0	3.09742E-08	1.18E-07	4.83E-10	1.09504E-10	0

Tabella 98. Peso del processo “Seedlings at greenhouse, EU”

Categoria di danno	Unità	Totale	Seedlings, at greenhouse, EU	Electricity, low voltage {RER}| market group for | APOS, U	Gasoline, combusted in equipment/EU	Nitrogen fertilizer, production mix, at plant/US	Phosphorous fertilizer, production mix, at plant/US	Dummy_Potassium fertilizer, production mix, at plant/kg/RNA
Totale	mPt	1.785319	0.208445	0.849148512	0.717341485	0.004281181	0.006102761	0
Human health	mPt	1.591751	0.173465	0.773564594	0.635497752	0.003944938	0.005277998	0
Ecosystems	mPt	0.163664	0.03498	0.069389078	0.058252567	0.000239554	0.000802862	0
Resources	mPt	0.029905	0	0.00619484	0.023591167	9.66891E-05	2.19007E-05	0

Tabella 99. Punteggio singolo del processo “Seedlings at greenhouse, EU”

Categoria di danno	Unità	Totale	Seedlings, at greenhouse, EU	Electricity, low voltage {RER}| market group for | APOS, U	Gasoline, combusted in equipment/EU	Nitrogen fertilizer, production mix, at plant/US	Phosphorous fertilizer, production mix, at plant/US	Dummy_Potassium fertilizer, production mix, at plant/kg/RNA
Totale	mPt	1.785319	0.208445	0.849149	0.717341	0.004281	0.006103	0
Human health	mPt	1.591751	0.173465	0.773565	0.635498	0.003945	0.005278	0
Ecosystems	mPt	0.163664	0.03498	0.069389	0.058253	0.00024	0.000803	0
Resources	mPt	0.029905	0	0.006195	0.023591	9.67E-05	2.19E-05	0

Tabella 100. Valutazione dei danni del processo "Seedlings at greenhouse, EU"

Categoria di danno	Unità	Totale	Seedlings, at greenhouse, EU	Electricity, low voltage {RER}| market group for | APOS, U	Gasoline, combusted in equipment/EU	Nitrogen fertilizer, production mix, at plant/US	Phosphorous fertilizer, production mix, at plant/US	Dummy_Potassium fertilizer, production mix, at plant/kg/RNA
Human health	DALY	9.45E-08	1.03E-08	4.59E-08	3.77E-08	2.34E-10	3.13E-10	0
Ecosystems	species.yr	2.93E-10	6.26E-11	1.24E-10	1.04E-10	4.29E-13	1.44E-12	0
Resources	USD2013	0.004188	0	0.000868	0.003304	1.35E-05	3.07E-06	0

13 Riferimenti bibliografici

1. T. Susca, F. Zanghirella, L. Colasuonno, e V. Del Fatto, «Effect of green wall installation on urban heat island and building energy use: a climate-informed review», *Renew. Sustain. Energy Rev.*, In review.
2. H. E. Landsberg, *The Urban Climate*. Academic Press, 1981.
3. S. D. Gedzelman *et al.*, «Mesoscale aspects of the Urban Heat Island around New York City», *Theor. Appl. Climatol.*, vol. 75, n. 1–2, pag. 14, 2003, doi: https://doi.org/10.1007/s00704-002-0724-2.
4. X. Li, Y. Zhou, S. Yu, G. Jia, H. Li, e W. Li, «Urban heat island impacts on building energy consumption: A review of approaches and findings», *Energy*, vol. 174, pagg. 407–419, mag. 2019, doi: 10.1016/j.energy.2019.02.183.
5. L. Shi, I. Kloog, A. Zanobetti, P. Liu, e J. D. Schwartz, «Impacts of temperature and its variability on mortality in New England», *Nat. Clim. Change*, vol. 5, n. 11, pagg. 988–991, nov. 2015, doi: 10.1038/nclimate2704.
6. T. Susca, «Green roofs to reduce building energy use? A review on key structural factors of green roofs and their effects on urban climate», *Build. Environ.*, vol. 162, pag. 106273, set. 2019, doi: 10.1016/j.buildenv.2019.106273.
7. T. Susca, F. Zanghirella, L. Colasuonno, e V. Del Fatto, «Effect of green wall installation on urban heat island and building energy use: a climate-informed systematic literature review», *Renew. Sustain. Energy Rev.*, In press.
8. Rete Micrometeorologica, «Rete Micrometeorologica - Rete Micrometeo - CKAN», *Open data - Regione Lazio*, 2020. http://dati.lazio.it/catalog/it/dataset/rete-micrometeorologica/resource/c32c804e-1b4f-448c-b0a4-4010c98020f3?filters=Codice%20stazione%3AAL004 (consultato 24 maggio 2021).
9. Arpa Piemonte, «ARPA Piemonte - Dati Meteo», *Open data - Regione Piemonte*, 2020. https://www.arpa.piemonte.it/rischinaturali/accesso-ai-dati/Richieste-dati-formato-standard/richiesta-dati/Richiesta-automatica/Dati-meteo-orari.html (consultato 21 maggio 2021).
10. T. Susca, S. R. Gaffin, e G. R. Dell'Osso, «Positive effects of vegetation: Urban heat island and green roofs», *Environ. Pollut.*, vol. 159, n. 8, pagg. 2119–2126, ago. 2011, doi: 10.1016/j.envpol.2011.03.007.
11. EuroPomice, «Vulcaflor», 2021. https://www.europomice.it/prodotti/mix-vulcanici/vulcaflor/, https://www.europomice.it/prodotti/mix-vulcanici/vulcaflor/ (consultato 22 marzo 2021).
12. A. Palla, I. Gnecco, e L. G. Lanza, «Unsaturated 2D modelling of subsurface water flow in the coarse-grained porous matrix of a green roof», *J. Hydrol.*, vol. 379, n. 1, pagg. 193–204, dic. 2009, doi: 10.1016/j.jhydrol.2009.10.008.
13. N. K. C. Twarakavi, M. Sakai, e J. Šimůnek, «An objective analysis of the dynamic nature of field capacity», *Water Resour. Res.*, vol. 45, n. 10, 2009, doi: https://doi.org/10.1029/2009WR007944.
14. ENVI_MET, «ENVI_MET», *Microclimate Simulations | ENVI_MET*, 2019. https://www.envi-met.com/intro/ (consultato 21 gennaio 2019).
15. T. Susca, F. Zanghirella, L. Colasuonno, e V. Del Fatto, «Tecnologie verdi: effetti sui consumi energetici degli edifici, sulla mitigazione dell'isola di calore urbana, scenari, modelli e Life Cycle Inventory». 2020.
16. A. A. Ghafar, I. Said, A. M. Fauzi, M. S. Shai-In, e B. Jaafar, «Comparison of leaf area index from four plant species on vertical greenery system in Pasir Gudang, Malaysia», *J. Sci. Technol.*, vol. 28, n. 2, pagg. 735–748, 2020.
17. UNI EN ISO 10456:2008, «Materiali e prodotti per edilizia - Proprietà igrometriche - Valori tabulati di progetto e procedimenti per la determinazione dei valori termici dichiarati e di progetto». UNI, 2008.
18. Ying Zhao, Bing Cheng Si, Zhenhua Zhang, Min Li, Hailong He, e Robert Hill, «A new thermal conductivity model for sandy and peat soils», *Agric. For. Meteorol.*, vol. 274, n. 6, pagg. 95–105, mag. 2019, doi: 10.1016/j.agrformet.2019.04.004.
19. W. Yang e S. T. Omaye, «Air pollutants, oxidative stress and human health», *Mutat. Res. Toxicol. Environ. Mutagen.*, vol. 674, n. 1, pagg. 45–54, mar. 2009, doi: 10.1016/j.mrgentox.2008.10.005.

20. T. R. Oke, «The distinction between canopy and boundary-layer urban heat islands», *Atmosphere*, vol. 14, n. 4, pagg. 268–277, 1976, doi: https://doi.org/10.1080/00046973.1976.9648422.
21. J. Yang, B. Shi, Y. Zheng, Y. Shi, e G. Xia, «Urban form and air pollution disperse: Key indexes and mitigation strategies», *Sustain. Cities Soc.*, vol. 57, pag. 101955, giu. 2020, doi: 10.1016/j.scs.2019.101955.
22. Presidente della Repubblica Italiana, *Legge n. 615*. 1966. Consultato: 16 febbraio 2022. [Online]. Disponibile su: https://www.gazzettaufficiale.it/atto/serie_generale/caricaDettaglioAtto/originario?atto.dataPubblicazioneGazzetta=1966-08-13&atto.codiceRedazionale=066U0615&elenco30giorni=false
23. I. Pigliautile, G. Marseglia, e A. L. Pisello, «Investigation of CO2 Variation and Mapping Through Wearable Sensing Techniques for Measuring Pedestrians' Exposure in Urban Areas», *Sustainability*, vol. 12, n. 9, Art. n. 9, gen. 2020, doi: 10.3390/su12093936.
24. N. J. Langford, «Carbon Dioxide Poisoning», *Toxicol. Rev.*, vol. 24, n. 4, pagg. 229–235, dic. 2005, doi: 10.2165/00139709-200524040-00003.
25. V. Anderson e W. A. Gough, «Evaluating the potential of nature-based solutions to reduce ozone, nitrogen dioxide, and carbon dioxide through a multi-type green infrastructure study in Ontario, Canada», *City Environ. Interact.*, vol. 6, pag. 100043, apr. 2020, doi: 10.1016/j.cacint.2020.100043.
26 J. Li *et al.*, «Effect of green roof on ambient CO2 concentration», *Build. Environ.*, vol. 45, n. 12, pagg. 2644–2651, dic. 2010, doi: 10.1016/j.buildenv.2010.05.025.
27. M. Marchi, R. M. Pulselli, N. Marchettini, F. M. Pulselli, e S. Bastianoni, «Carbon dioxide sequestration model of a vertical greenery system», *Ecol. Model.*, vol. 306, pagg. 46–56, giu. 2015, doi: 10.1016/j.ecolmodel.2014.08.013.
28. L. J. Whittinghill, D. B. Rowe, R. Schutzki, e B. M. Cregg, «Quantifying carbon sequestration of various green roof and ornamental landscape systems», *Landsc. Urban Plan.*, vol. 123, pagg. 41–48, mar. 2014, doi: 10.1016/j.landurbplan.2013.11.015.
29. R. Sultana, Z. Ahmed, Md. A. Hossain, e B. A. Begum, «Impact of green roof on human comfort level and carbon sequestration: A microclimatic and comparative assessment in Dhaka City, Bangladesh», *Urban Clim.*, vol. 38, pag. 100878, lug. 2021, doi: 10.1016/j.uclim.2021.100878.
30. S. Tsoka, K. Tsikaloudaki, e T. Theodosiou, «Coupling a Building Energy Simulation Tool with a Microclimate Model to Assess the Impact of Cool Pavements on the Building's Energy Performance Application in a Dense Residential Area», *Sustainability*, vol. 11, n. 9, Art. n. 9, gen. 2019, doi: 10.3390/su11092519.
31. G. Cammarata, M. Cammarata, e G. Capizzi, «Sviluppo di metodologie e strumenti di misura ed analisi dei consumi energetici degli edifici pubblici», Report Ricerca di Sistema Elettrico RdS/2013/119, 2014. [Online]. Disponibile su: https://www.enea.it/it/Ricerca_sviluppo/documenti/ricerca-di-sistema-elettrico/edifici-pa/2013/rds-par2013-119.pdf
32. M. Caldera *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», Report Ricerca di Sistema Elettrico RdS/PAR2015/143, 2016. [Online]. Disponibile su: https://www.enea.it/it/Ricerca_sviluppo/documenti/ricerca-di-sistema-elettrico/adp-mise-enea-2015-2017/edifici-intelligenti/rds_par2015-143.pdf
33. T. Susca, F. Zanghirella, e L. Colasuonno, «Analisi preliminari e raccolta dati relativi agli effetti delle tecnologie verdi sulla mitigazione dell'isola di calore urbana», ENEA, Report Ricerca di Sistema Elettrico RdS/PTR2019/043, Dicembre 2019. [Online]. Disponibile su: https://www.enea.it/it/Ricerca_sviluppo/documenti/ricerca-di-sistema-elettrico/adp-mise-enea-2019-2021/tecnologie-efficienza-risparmio-edifici/report-rds_ptr_2019_043.pdf
34. «UNI EN ISO 13790:2008 Prestazione energetica degli edifici. Calcolo del fabbisogno di energia per il riscaldamento e il raffrescamento». 2008.
35. Comitato Termotecnico Italiano (CTI), «Anni tipo climatici per applicazioni termotecniche». https://try.cti2000.it/ (consultato 22 settembre 2021).

36. Pataky, Rita, «Outline of the Design and Functioning of Green Shading Systems, Compared to Industrial Products», *Period. Polytech. Archit.*, vol. 47, n. 1, pagg. 30–40, 2016, doi: 10.3311/PPar.8913.
37. International Organization for Standardization, «ISO 14040:2006 - Environmental management -- Life cycle assessment -- Principles and framework». 2006. Consultato: 21 giugno 2018. [Online]. Disponibile su: https://www.iso.org/standard/37456.html
38. International Organization for Standardization, «ISO 14044:2006 - Environmental management -- Life cycle assessment -- Requirements and guidelines», 2006. https://www.iso.org/standard/38498.html (consultato 21 giugno 2018).
39. PRé Sustainability, «ReCiPe», *PRé Sustainability*, 2016. https://pre-sustainability.com/articles/recipe/ (consultato 23 novembre 2021).
40. E. Dekker, M. C. Zijp, M. E. van de Kamp, E. H. M. Temme, e R. van Zelm, «A taste of the new ReCiPe for life cycle assessment: consequences of the updated impact assessment method on food product LCAs», *Int. J. Life Cycle Assess.*, vol. 25, n. 12, pagg. 2315–2324, dic. 2020, doi: 10.1007/s11367-019-01653-3.
41. M. A. J. Huijbregts *et al.*, «ReCiPe2016: a harmonised life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level», *Int. J. Life Cycle Assess.*, vol. 22, n. 2, pagg. 138–147, feb. 2017, doi: 10.1007/s11367-016-1246-y.
42. R. B. Zortea, V. G. Maciel, e A. Passuello, «Sustainability assessment of soybean production in Southern Brazil: A life cycle approach», *Sustain. Prod. Consum.*, vol. 13, pagg. 102–112, gen. 2018, doi: 10.1016/j.spc.2017.11.002.
43. G. Espadas-Aldana, C. Vialle, J.-P. Belaud, C. Vaca-Garcia, e C. Sablayrolles, «Analysis and trends for Life Cycle Assessment of olive oil production», *Sustain. Prod. Consum.*, vol. 19, pagg. 216–230, lug. 2019, doi: 10.1016/j.spc.2019.04.003.
44. T. R. Oke, «City size and the urban heat island», *Atmos. Environ.*, vol. 7, pagg. 769–779, 1973.
45. V. Sangiorgio, F. Fiorito, e M. Santamouris, «Development of a holistic urban heat island evaluation methodology», *Sci. Rep.*, vol. 10, n. 1, Art. n. 1, ott. 2020, doi: 10.1038/s41598-020-75018-4.
46. A. Barreca, K. Clay, O. Deschenes, M. Greenstone, e J. S. Shapiro, «Adapting to Climate Change: The Remarkable Decline in the US Temperature-Mortality Relationship over the Twentieth Century», *J. Polit. Econ.*, vol. 124, n. 1, pagg. 105–159, feb. 2016, doi: 10.1086/684582.
47. J. K. Vanos, J. W. Baldwin, O. Jay, e K. L. Ebi, «Simplicity lacks robustness when projecting heat-health outcomes in a changing climate», *Nat. Commun.*, vol. 11, n. 1, pag. 6079, nov. 2020, doi: 10.1038/s41467-020-19994-1.
48. T. Susca, «Multiscale Approach to Life Cycle Assessment», *J. Ind. Ecol.*, vol. 16, n. 6, pagg. 951–962, dic. 2012, doi: 10.1111/j.1530-9290.2012.00560.x.
49. G. Peri, M. Traverso, M. Finkbeiner, e G. Rizzo, «Embedding “substrate” in environmental assessment of green roofs life cycle: evidences from an application to the whole chain in a Mediterranean site», *J. Clean. Prod.*, vol. 35, pagg. 274–287, nov. 2012, doi: 10.1016/j.jclepro.2012.05.038.
50. P. Vacek, K. Struhala, e L. Matějka, «Life-cycle study on semi intensive green roofs», *J. Clean. Prod.*, vol. 154, pagg. 203–213, giu. 2017, doi: 10.1016/j.jclepro.2017.03.188.
51. TEGNOS Research, «Life Cycle Inventory and Assessment of Selected Low Slope Roofing Systems in North America». 2010. Consultato: 29 ottobre 2020. [Online]. Disponibile su: https://epdmroofs.org/wp-content/uploads/2018/04/2010_05_30_lifecycleinventoryassessmentofselectedlowsloperoofingsystemsinnorthamerica.pdf
52. A. Brachet, N. Schiopu, e P. Clergeau, «Biodiversity impact assessment of building’s roofs based on Life Cycle Assessment methods», *Build. Environ.*, vol. 158, pagg. 133–144, lug. 2019, doi: 10.1016/j.buildenv.2019.04.014.
53. H. Altan, N. John, e J. Yoshimi, «Comparative Life Cycle Assessment of green wall systems in the UK», in *ISBS*, Ankara - Turkey, mag. 2015, pagg. 991–999. [Online]. Disponibile su: http://isbs2015.gazi.edu.tr/belgeler/bildiriler/991-999.pdf

54. A. Gasparrini *et al.*, «Mortality risk attributable to high and low ambient temperature: a multicountry observational study», *The Lancet*, vol. 386, n. 9991, pagg. 369–375, lug. 2015, doi: 10.1016/S0140-6736(14)62114-0.
55. ISTAT, «Edifici residenziali», 2011. http://dati-censimentopopolazione.istat.it/Index.aspx?DataSetCode=DICA_EDIFICIRES (consultato 28 gennaio 2021).
56. ISTAT, «Tavole di mortalità», 2011. http://dati.istat.it/Index.aspx?DataSetCode=DCIS_MORTALITA1# (consultato 27 gennaio 2021).
57. T. Susca, F. Zanghirella, L. Colasuonno, e V. Del Fatto, «Effect of green wall installation on urban heat island and building energy use: A climate-informed systematic literature review», *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 159, pag. 112100, mag. 2022, doi: 10.1016/j.rser.2022.112100.

14 Abbreviazioni ed acronimi

UHI	Urban Heat Island – isola di calore urbana
RdS	Ricerca di Sistema
LCA	Life Cycle Assessment – valutazione del ciclo di vita
LCI	Life Cycle Inventory – inventario di cico di vita
LAI	Leaf Area Index – indice di superficie fogliare
CO_2	Anidride carbonica