

ALMA MATER STUDIORUM - UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

SCUOLA DI INGEGNERIA E ARCHITETTURA

CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA EDILE-ARCHITETTURA

DICAM

Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica, Ambientale e dei Materiali

TESI DI LAUREA

in

Costruzioni Idrauliche Urbane

**MITIGAZIONE DELL'ISOLA DI CALORE
ATTRAVERSO I TETTI VERDI: IL CASO DI
STUDIO DI VIA TERRACINI A BOLOGNA**

CANDIDATO:

Valentina Villani

RELATORE:

Prof. Ing. Marco Maglionico

CORRELATORI:

Ing. Sara Simona Cipolla

Prof. Ing. Giovanni Semprini

Anno Accademico 2013-2014

Sessione III

Indice

1. Abstract	1
2. Evoluzione storica del verde pensile	2
2.1 I tetti verdi dall'antichità al 1865	2
2.2 L'evoluzione dagli ultimi due secoli ad oggi.....	5
3. Le caratteristiche principali di un tetto verde	6
3.1 Classificazione delle coperture a verde.....	6
3.2 Stratigrafia	9
3.3 La scelta del verde.....	18
3.3.1 Fattori che influiscono sulla progettazione del verde	18
3.3.1.1 Il clima	18
3.3.1.2 La temperatura	22
3.3.1.3 La luce.....	23
3.3.1.4 L'acqua.....	24
3.3.1.5 L'altezza del substrato	25
3.3.1.6 Particolari necessità.....	26
3.3.2 Tipologie di piante adatte ad un tetto verde	28
3.3.2.1 Piante grasse a crescita lenta	28
3.3.2.2 Erbacee perenni	29
3.3.2.3 Piante annuali e biennali.....	29
3.3.2.4 Tappeti erbosi.....	30
3.3.2.5 Piccoli cespugli	30
3.3.2.6 Cespugli	30
3.3.2.7 Alberi	31
3.3.3 Sistemi d'inverdimento.....	31
3.3.3.1 Piantagione	31

3.3.3.2	Talee	32
3.3.3.3	Semina	32
3.3.3.4	Stuoie precoltivate	32
3.3.4	Progettare in funzione della manutenzione	33
4.	Benefici dei tetti verdi.....	34
4.1	Regimazione idrica	34
4.2	Qualità delle acque	36
4.3	La qualità dell'aria.....	37
4.4	Isolamento termico	39
4.5	Influenza sulla durata dell'impermeabilizzazione.....	41
4.6	Isolamento acustico	42
4.7	Protezione dalle onde magnetiche	45
4.8	Aumento della resa dei pannelli solari.....	47
4.9	Spazio aggiionale.....	48
4.10	Biodiversità	49
4.11	Mitigazione del fenomeno di isola di calore urbana	51
5.	L'isola di calore urbana (UHI).....	52
5.1	Isole di calore urbano, cambiamenti climatici e riscaldamento globale	52
5.2	Classificazione delle tipologie di UHI	53
5.2.1	L'isola di calore superficiale	54
5.2.2	L'isola di calore atmosferica.....	54
5.2.3	Correlazione tra UHI di superficie e di atmosfera	56
5.3	Fattori che influenzano l'isola di calore urbana.....	59
5.3.1	Il profilo del vento nelle aree urbane	60
5.3.2	Il bilancio energetico in ambito urbano.....	63
5.3.3	L'effetto canyon e lo sky view factor.....	67
5.4	L'effetto mitigativo dei tetti verdi.....	70

5.5	L'isola di calore relativa alla città di Bologna	73
6.	Il caso di studio di Bologna	76
6.1	Il sito di studio	76
6.1.1	Il corpo 5 ed il corpo 8	79
6.1.2	L'analisi dei carichi.....	80
6.1.3	I pacchetti.....	83
6.2	La strumentazione	89
6.2.1	La stazione Hobo.....	89
6.2.2	Le sonde.....	93
6.2.3	La termocamera	94
6.2.4	Le termocoppie.....	96
6.2.5	I misuratori di livello	98
6.3	Analisi dati	100
6.3.1	I parametri ambientali	100
6.3.1.1	Il vento.....	100
6.3.1.2	La temperatura ambiente.....	103
6.3.1.3	Le piogge.....	104
6.3.2	Andamento delle temperature.....	107
6.3.2.1	Il mese di Giugno.....	107
6.3.2.2	Il mese di Luglio.....	110
6.3.2.3	Il mese di Settembre.....	115
6.3.2.4	Il mese di Ottobre	120
6.3.2.5	Il mese di Novembre.....	136
6.3.3	Comportamento idraulico.....	145
7.	Modelli di simulazione per lo <i>urban design</i> : ENVI-met	147
7.1	La scelta del software: ENVI-met.....	147
7.2	Com'è strutturato ENVI-met.....	155

7.2.1	L'Area Input File	156
7.2.2	Il Configuration File.....	160
7.2.3	ENVI-met Default Config.....	163
7.2.4	Leonardo 2014	164
7.3	Il modello fisico	165
7.3.1	Il vento.....	165
7.3.2	Temperatura ed umidità.....	167
7.3.3	La turbolenza atmosferica.....	167
7.3.4	La radiazione solare	169
7.3.5	Il modello del suolo	170
7.3.6	La vegetazione	170
7.4	Simulazione relativa all'area del Lazzaretto	171
7.4.1	Scenario 1: lo stato attuale in data 19/07/14	171
7.4.1.1	L'Area Input File	171
7.4.1.2	Il Configuration File.....	176
7.4.1.3	I risultati.....	179
7.4.2	Scenario 2: tetti verdi a Sedum in data 19/07/14.....	188
7.4.2.1	L'Area Input File	188
7.4.2.2	Il Configuration File.....	188
7.4.2.3	I risultati.....	191
7.4.3	Scenario 3: tetti verdi autoctoni in data 19/07/14	196
7.4.3.1	L'Area Input File	196
7.4.3.2	Il Configuration File.....	196
7.4.3.3	I risultati.....	196
7.4.4	Confronti tra scenari in data 19/07/14	201
7.4.4.1	Confronto tra scenario 1 e 2	201
7.4.4.2	Confronto tra scenario 1 e 3	206
7.4.5	Scenario 4: lo stato attuale in data 24/10/14	210

7.4.5.1	L'Area Input File	210
7.4.5.2	Il Configuration File.....	211
7.4.5.3	I risultati.....	213
7.4.6	Scenario 5: tetti verdi a Sedum in data 19/07/14.....	223
7.4.6.1	L'Area Input File	223
7.4.6.2	Il Configuration File.....	223
7.4.6.3	I risultati.....	224
7.4.7	Scenario 6: tetti verdi autoctoni in data 20/10/14	230
7.4.7.1	L'Area Input File	230
7.4.7.2	Il Configuration File.....	230
7.4.7.3	I risultati.....	231
7.4.8	Confronti tra scenari in data 24/10/14	237
7.4.8.1	Confronto tra scenario 4 e 5	237
7.4.8.2	Confronto tra scenario 4 e 6	243
8.	Conclusioni e possibili sviluppi futuri.....	250
	Bibliografia.....	253

1. Abstract

Con il termine “tetti verdi” si intendono vere e proprie coperture vegetate, che fungono da valida alternativa alle tipologie convenzionali a coppi oppure in guaina impermeabilizzante.

Per quanto questi possano essere considerati una soluzione moderna relativa alle diverse Best Management Practices (BMP), in realtà sono stati realizzati e sfruttati fin dall'antichità. Dagli anni Settanta ad oggi hanno preso sempre più piede in Europa e negli altri continenti a causa dei molteplici benefici che li accompagnano a livello ambientale.

All'interno di questo studio ci si pone l'obiettivo di valutarne i vantaggi, principalmente a livello energetico ed idraulico, riscontrati in letteratura, direttamente sul campo, grazie al sito di studio presso la sede di Ingegneria di via Terracini, Bologna. Sulle coperture del LAGIRN (Laboratorio di Geoingegneria e Risorse Naturali), infatti, nell'estate 2013 sono stati realizzati due tetti verdi (uno a Sedum, che sarà indicato con la sigla GR, e uno con piante autoctone, identificato con la sigla NA).

Tramite il confronto tra le temperature registrate grazie a diversi tipi di strumentazione, è stato possibile quantificare i comportamenti delle coperture su scala annuale, non solo l'una rispetto l'altra, ma anche in rapporto a una porzione di tetto lasciata a guaina bituminosa (indicato con la sigla RR).

Considerando il ruolo della vegetazione come strumento per la mitigazione del fenomeno d'isola di calore urbana, infine, con l'ausilio del software CFD denominato ENVI-met si è modellata l'intera area del Lazzaretto e si sono simulati tre diversi scenari:

- 1) Lo stato attuale
- 2) Una situazione ipotetica con tutte coperture a Sedum
- 3) Una situazione ipotetica con tutte coperture con specie autoctone

per la giornata estiva più calda e per un comune giorno di Ottobre, a seguito di una minuziosa calibrazione. Il confronto tra la situazione reale e quelle supposte dimostra la validità dei green roofs nella lotta al riscaldamento delle grandi città.

2. Evoluzione storica del verde pensile

Per quanto i tetti verdi possano essere considerati una soluzione moderna relativa alle diverse Best Management Practices, in realtà sono stati realizzati e sfruttati fin dall'antichità.

2.1 I tetti verdi dall'antichità al 1865

La copertura a verde più antica di cui si ha conoscenza risale ai Giardini pensili di Babilonia (Figura 2.1), considerati una delle Sette Meraviglie del mondo antico e costruito attorno al 600 a. C. su commissione di Nabucodonosor II.

Diversi autori classici (1) li descrivono come sorretti da archi in pietra e impermeabilizzati tramite strati di canne e di bitume, ospitando piante e persino alberi (2). Per quanto è possibile desumere dall'iconografia, la vegetazione doveva essere lussureggiante, soprattutto se confrontata con l'arido territorio circostante.

Purtroppo la localizzazione di tali giardini è ancora irrisolta e continuano ad emergere numerose ipotesi.

Al contrario, sono giunti ai giorni nostri alcuni rifugi, come quelli ritrovati in Scandinavia, caratterizzati da coperture in zolle di terreno e risalenti ai tempi dei Vichinghi ed al Medioevo.

Esistono ad oggi siti protetti dall'Unesco, quali ad esempio L'Anse aux Meadows, Newfoundland, Canada, risalenti al 1000 D.C. che testimoniano appunto come fosse usanza realizzare ricoveri tramite riporti di terreno che ben si mimetizzano con il contesto ambientale (Figura 2.2) (3).



Figura 2.1: ricostruzione dei giardini pensili di Babilonia (http://it.wikipedia.org/wiki/Giardini_pensili_di_Babilonia)



Figura 2.2: L'Anse aux Meadows, Newfoundland, Canada (http://it.wikipedia.org/wiki/L'Anse_aux_Meadows)

Purtroppo, se questi rifugi garantivano la protezione dalle intemperie, un buon isolamento durante i mesi invernali e un raffrescamento adeguato durante quegli estivi, non né erano stagni né impedivano ai piccoli animali di entrarvi.

Per quanto concerne l'Italia, le prime testimonianze di tetti verdi risalgono al periodo etrusco (dal IX secolo a.C.). Infatti era consuetudine di questo popolo ornare i propri monumenti funerari con tumuli di terra, sui quali piantavano poi anche degli alberi.

Si sono conservati fino ai giorni nostri, a titolo esemplificativo, i resti della necropoli della Banditaccia, Cerveteri (RM) (Figura 2.3). Ognuna delle sepolture appartenenti al complesso era formata da una cavità scavata nel terreno in cui si approntavano una o più stanze per la deposizione dell'urna cineraria e degli oggetti cari al defunto, mentre all'esterno veniva circondata da un muro coperto da una cupola sulla quale venivano piantate diverse essenze vegetali.

L'usanza di rendere verde la superficie dei tumuli funerari proseguì fino ai tempi dei Romani, durante i quali risulta che anche l'imperatore Augusto la richiese per il proprio mausoleo nel 29 a.C. (Figura 2.4). La muratura esterna dell'edificio era originariamente coperta di terra nella quale vegetavano numerosi cipressi, simbolo di vita e di gloria eterna (4).

Più tardi, anche Adriano la ripropose per il medesimo fine (139 d.C.). Similmente al mausoleo di Augusto, il manufatto originale era ricoperto da cipressi posti a dimora su tumuli di terra.

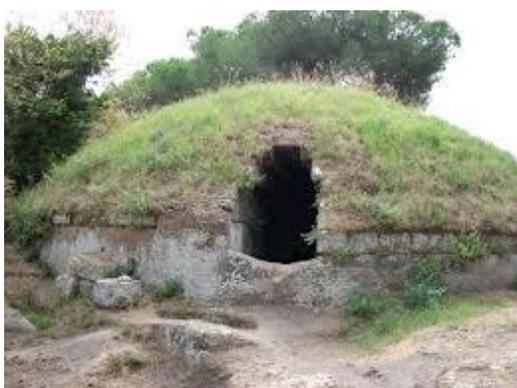


Figura 2.3: sepoltura appartenente alla necropoli della Banditaccia
(http://it.wikipedia.org/wiki/Necropoli_della_Banditaccia)

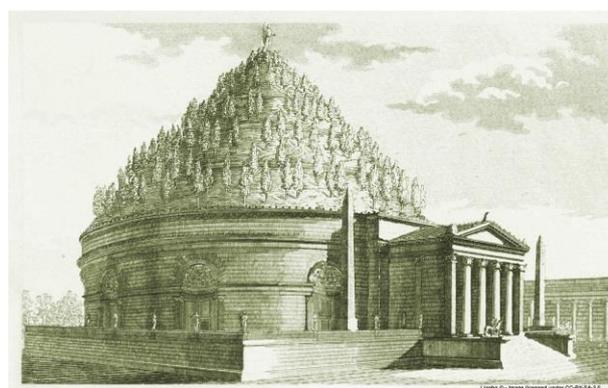


Figura 2.4: simulazione grafica dell'architettura originaria mausoleo di Augusto da parte di Luigi Canina
(http://it.wikipedia.org/wiki/Mausoleo_di_Augusto)

Se nel periodo romano il verde pensile vede una delle sue massime espressioni, come a villa Adriana a Tivoli o la villa in Toscana di Plinio il Giovane, con l'avvento del Medioevo esso perde la propria valenza artistica a scapito della mera funzione ortofrutticola all'interno dei chiostrini dei conventi.

Si può difatti notare come la presenza del verde in questo periodo assuma una caratteristica prettamente funzionale rimarcandone la presenza, ad esempio, lungo la cinta muraria di diverse città (basti pensare alla città di Lucca, Figura 2.5).

In questi casi il verde assumeva una funzione bellica, in quanto la sua presenza serviva per attutire eventuali colpi di cannone permettendo al contempo un facile e veloce ripristino degli eventuali danni subiti.

Si abbandonò questa fase verso il 1400 quando si rivalutò anche l'aspetto estetico del verde. Si faccia riferimento ad esempio alla villa Medici di Fiesole (Figura 2.6), la cui realizzazione fu affidata al Michelozzo all'incirca nel 1450, i cui giardini si estendono su ben tre livelli.

Successivamente, durante tutto il Cinquecento ed il Seicento, in Italia, ma anche all'estero vennero edificate sontuose ville di cui il giardino pensile costituisce un immancabile elemento. In questo periodo però il verde ha essenzialmente una funzione artistica ed estetica.

Bisogna attendere fino al 1865 perché ce ne si occupi anche sotto il profilo funzionale ed ecologico. L'architetto tedesco Von Rabitz fu il primo a scrivere un libro in merito



Figura 2.5: fotografia delle mura della città di Lucca ai giorni nostri



Figura 2.6: fotografia di Villa Medici, Fiesole (<http://www.livingonthechic.com/2011/05/im-baacckkkkk.html>)

all'utilità del verde pensile e ai benefici della sua applicazione all'interno della città.

Non a caso proprio in quegli anni si stavano affrontando temi quali la riqualificazione delle zone industriali in merito alla loro salubrità e la progettazione di grandi parchi pubblici, come ad esempio Central Park.

2.2 L'evoluzione dagli ultimi due secoli ad oggi

Nella prima metà del XX secolo, nell'ambito architettonico, il rapporto tra edificio e ambiente diventa sempre più forte, come testimoniato da autori come Wright, Aalto e Markelius che, nelle loro opere, tengono sempre in maggior conto il paesaggio circostante.

Le Corbusier, in particolare, considera il tetto giardino come uno dei "cinque punti dell'architettura", considerandolo sia sotto l'aspetto tecnologico (protezione della struttura dal punto di vista termico) sia sotto quello di impatto ambientale (restituzione della superficie occupata).

Durante la crisi del petrolio avvenuta negli anni Settanta ed in seguito ai danni apportati dalla seconda guerra mondiale, la Germania dell'Ovest iniziò ad esplorare alcune soluzioni al fine di diminuire le perdite energetiche a tutto tondo.

Proprio in questa culla nacque la FLL, Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau (Associazione di ricerca dei costruttori del paesaggio) con lo scopo primario il recupero e il miglioramento dell'ambiente abitativo. Quest'associazione riuscì a far varare una legge di tutela ambientale che rese obbligatoria la realizzazione di aree verdi all'interno dei cortili e sulle coperture piane degli edifici.

La FLL ha inoltre redatto un manuale di direttive per la progettazione, manutenzione e realizzazione dei tetti verdi (5).

Partendo da tali linee guida e da quelle di altri paesi, quali esempio la Francia e la Svizzera, in coerenza con la normativa europea esistente, l'Italia si è dotata di una normativa nazionale con la UNI 11235:2007, la quale definisce le regole di progettazione, esecuzione, manutenzione e controllo di coperture a verde in rapporto alle particolari situazioni di destinazione d'uso, di contesto climatico ed edilizio.

3. Le caratteristiche principali di un tetto verde

Nel 2007 l'istituto UNI ha pubblicato la norma 11235, "La progettazione, l'esecuzione, il controllo e la manutenzione delle coperture a verde pensile". Essa è un vero codice di buona pratica e rappresenta la regola dell'arte in Italia.

3.1 Classificazione delle coperture a verde

All'interno del capitolo 6.1.2 della norma le coperture a verde vengono classificate a seconda di:

- a) la fruibilità;
- b) la pendenza superficiale;
- c) la manutenzione del sistema a verde;
- d) il controllo delle condizioni ambientali interne;
- e) la mitigazione ambientale per l'intorno territoriale.

a) La fruibilità

La copertura è classificata secondo lo schema seguente:

- accessibile ai soli manutentori;
- accessibile all'utenza;
- carrabile.

La fruibilità della copertura deve essere definita in quanto importante ai fini della determinazione del sistema dei carichi agenti su tutti gli strati o elementi, con particolare attenzione a quello di tenuta.

b) La pendenza superficiale

La pendenza superficiale p della copertura deve essere definita in quanto importante ai fini della determinazione dei sistemi di ancoraggio degli strati o elementi.

La copertura è classificata secondo lo schema seguente:

- $0 < p < 5\%$ (bassa);
- $5 \leq p < 15\%$ (media);
- $p \geq 15\%$ (alta).

c) La manutenzione del sistema a verde

La copertura è classificata secondo lo schema seguente:

- Classe 1: bassa manutenzione (estensivo);
- Classe 2: media manutenzione (intensivo leggero);
- Classe 3: alta manutenzione (intensivo).

Per ognuna di queste classi sono state individuate le specifiche (valori per m²/anno) dei principali parametri descrittivi indicati nel prospetto 3 della norma (Tabella 3.1).

La manutenzione della copertura deve essere definita in fase di progettazione, poiché determina i costi di gestione ed è strettamente connessa alla sostenibilità economica ed ambientale del sistema.

I tre livelli di manutenzione sono definiti nel modo seguente:

- Bassa manutenzione (sistema estensivo): gli interventi manutentivi si limitano ai controlli degli elementi del sistema.

In particolare, per lo strato di vegetazione, il controllo deve monitorare lo stato fisiologico e fitosanitario della vegetazione, la presenza di parassiti che possano limitarne la funzionalità, la presenza di infestanti, il cui insediamento può pregiudicare la funzionalità del sistema.

L'irrigazione può essere eseguita solo occasionalmente, con il fine di mantenere in vita la vegetazione, in condizioni non ordinarie di stress idrico.

- Media e alta manutenzione (sistemi intensivi): gli interventi manutentivi, oltre a comprendere i controlli degli elementi del sistema e dello strato di

Classi	Irrigazione	Manutenzione	M/C
	m ³ /m ²	Mdo h/m ² /anno	%
1	Solo di soccorso	< 0.02	M/C < 1
2	Prevista	0.21 – 0.06	1 < M/C ≤ 5
3	Prevista	> 0.06	M/C > 5
M	costo totale annuo della manutenzione ordinaria		
C	costo costruzione copertura a verde, al netto delle spese logistiche e di messa in quota dei materiali		
Mdo	manodopera		

Tabella 3.1: prospetto 3 della UNI 11235 - Classificazione della copertura in funzione della manutenzione (6)

vegetazione, già previsti per il sistema estensivo, includono tutte le attività agronomiche necessarie alla corretta gestione delle aree verdi.

È da evitare l'uso di attrezzature non idonee alla situazione in copertura (attrezzi appuntiti, strumenti per la lavorazione del terreno, ecc.).

L'irrigazione è necessaria al mantenimento delle prestazioni attese dal sistema e deve essere oggetto di progettazione specifica.

Ogni copertura a verde di tipo intensivo comporta un tenore di manutenzione proporzionale all'apporto di acqua, manodopera ed energia in genere ed è influenzato da tutti gli elementi identificativi del contesto, del sito e della copertura stessa, nonché dalle scelte di tipo architettonico e paesaggistico.

L'andamento qualitativo tra le variabili spessore/peso e costi di manutenzione è visibile in Figura 3.1.

d) Il controllo delle condizioni ambientali interne

La mitigazione ambientale per l'edificio è suddivisa secondo:

- il grado di isolamento acustico:
 - I livello: peso degli strati o elementi soprastanti l'elemento di tenuta minore di 150 kg/m^2 ;
 - II livello: peso degli strati o elementi soprastanti l'elemento di tenuta compresa fra i 150 kg/m^2 ed i 300 kg/m^2 ;
 - III livello: peso degli strati o elementi soprastanti l'elemento di tenuta maggiore di 300 kg/m^2 .

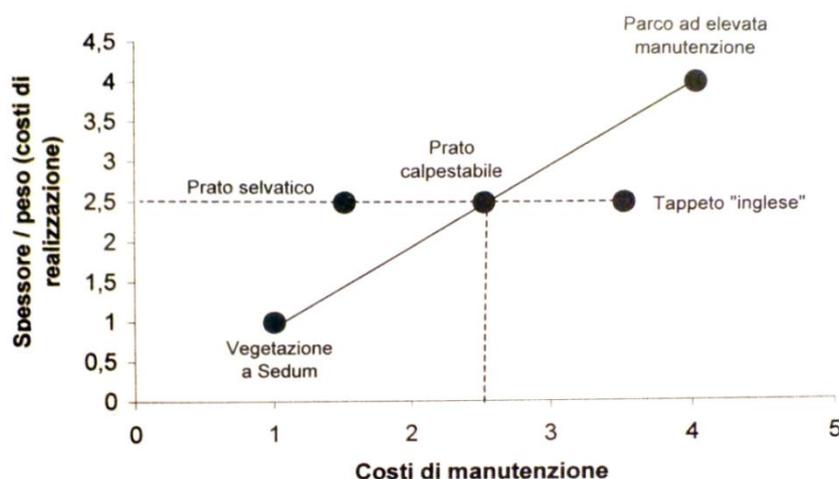


Figura 3.1: rapporto tra costi di manutenzione e spessore/peso/costi di realizzazione (7)

La scelta della classe deve essere coerente con le caratteristiche degli strati o elementi sottostanti l'elemento di tenuta.

- l'inerzia termica:
 - I livello: peso degli strati o elementi soprastanti l'elemento di tenuta maggiore di 150 kg/m²;
 - II livello: peso degli strati o elementi soprastanti l'elemento di tenuta compresa fra i 150 kg/m² ed i 300 kg/m²;
 - III livello: peso degli strati o elementi soprastanti l'elemento di tenuta maggiore di 300 kg/m².

La scelta della classe deve essere coerente con le caratteristiche degli strati o elementi sottostanti l'elemento di tenuta.

e) La mitigazione per l'intorno territoriale

Tali aspetti saranno approfonditi più specificatamente nel capitolo 4.

3.2 Stratigrafia

La norma considera il verde pensile un "sistema tetto" in tutta la sua completezza: vengono presi in considerazione tutti gli elementi che possono comporre una stratigrafia e ne vengono definiti i requisiti minimi. Tra questi elementi i seguenti, definiti primari, devono sempre essere presenti:

- Elemento portante
- Elemento di tenuta all'acqua
- Elemento di protezione all'azione delle radici (integrato o meno)
- Elemento di protezione meccanica
- Elemento di accumulo idrico
- Elemento drenante
- Elemento filtrante
- Strato colturale
- Strato di vegetazione

Per ognuno di questi elementi vengono descritte le tipologie comunemente diffuse allo stato dell'arte e le prestazioni che devono soddisfare.

Il valore di ogni caratteristica viene espresso in funzione di una norma di riferimento, che a sua volta definisce le procedure per la determinazione della caratteristica stessa. Un elemento può svolgere più di una funzione, ad esempio un manto impermeabile idoneo può svolgere sia la funzione di tenuta all'acqua che quella di barriera alla penetrazione delle radici (6).

Per chiarezza nella trattazione si riportano di seguito alcuni esempi di stratigrafie di sistemi a verde pensile dopo una breve descrizione delle caratteristiche che contraddistinguono, sotto il profilo tecnico, la tipologia.

1) Tetti verdi estensivi

Dal punto di vista pratico, l'estensivo si applica su coperture piane o inclinate di grandi dimensioni, prevalentemente su capannoni ed edifici industriali e commerciali in sostituzione delle usuali coperture di zavoratura in ghiaia o altri materiali inerti. Non è da considerare un giardino fruibile, ma una copertura a verde con valenza di mitigazione e compensazione ambientale.

L'inverdimento pensile estensivo è un sistema che, dopo il primo o secondo anno dell'impianto, richiede manutenzione ridotta. Normalmente sono sufficienti uno o due interventi l'anno.

È strutturato in modo che l'approvvigionamento idrico e degli elementi nutritivi avvenga nella misura maggiore possibile attraverso processi naturali.

La vegetazione impiegata è normalmente costituita da piante a sviluppo contenuto in altezza che richiedono ridotta manutenzione e con caratteristiche di veloce radicamento e copertura, resistenza alla siccità e al gelo, buona autorigenerazione e autopropagazione.

Attualmente, in attesa che dalla sperimentazione vengano fornite soluzioni alternative, in particolare per l'ambiente mediterraneo, le specie maggiormente utilizzate per la realizzazione di estensivi su grandi superfici a manutenzione minima sono quelle appartenenti al genere Sedum.

Nell'estensivo si possono impiegare con successo anche numerose altre erbacee perenni ma occorre valutare, caso per caso, quale sia la manutenzione a regime richiesta dalle specie utilizzate.

Lo spessore del substrato è normalmente ridotto; per il Nord e il Centro Italia a partire da circa 8 cm, che rappresentano il minimo nelle nostre condizioni climatiche per il Sedum, fino a 15 cm circa in funzione delle esigenze adottate.

Questi spessori sono leggermente da aumentare a mano a mano che ci si sposta verso le regioni meridionali (Figura 3.2 – Figura 3.5).

Il substrato impiegato è costituito prevalentemente da componenti minerali. Il peso delle stratificazioni in massima saturazione idrica è compreso tra i 75 e i 150 kg/ m². Il costo indicativo medio di un inverdimento estensivo varia tra i 40 e i 50 €/ m² (7).



Figura 3.2: particolare di tetto verde estensivo, DAKU (8)

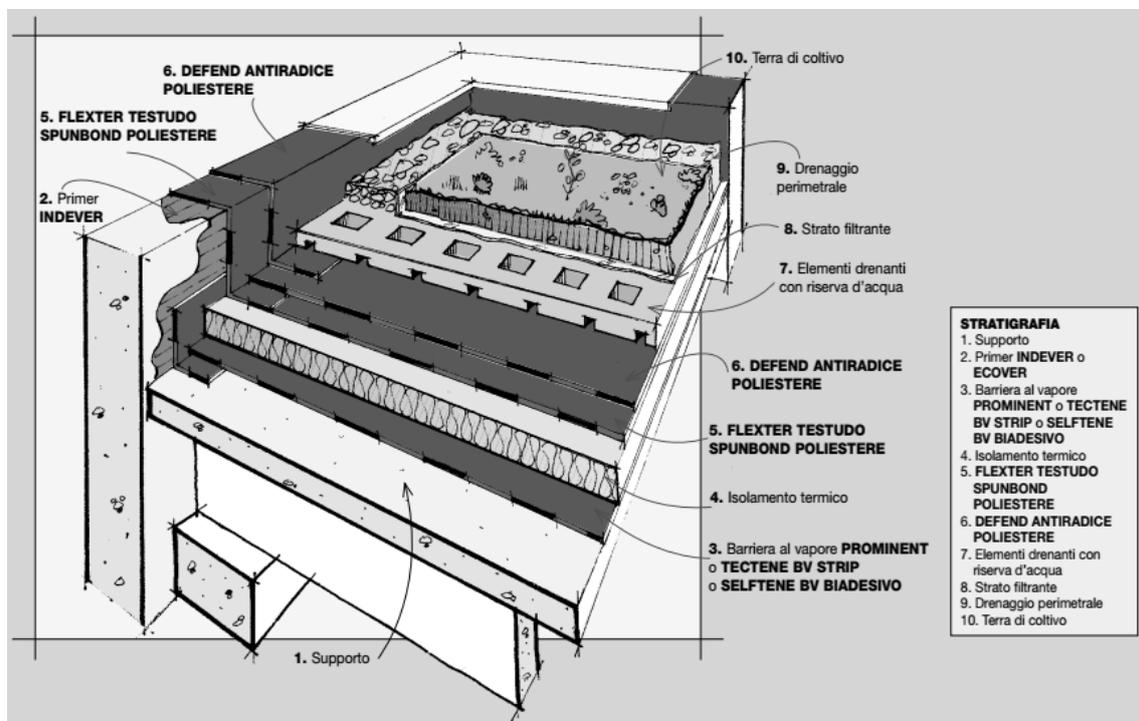


Figura 3.3: particolare di tetto verde estensivo, Index S.p.A (9)

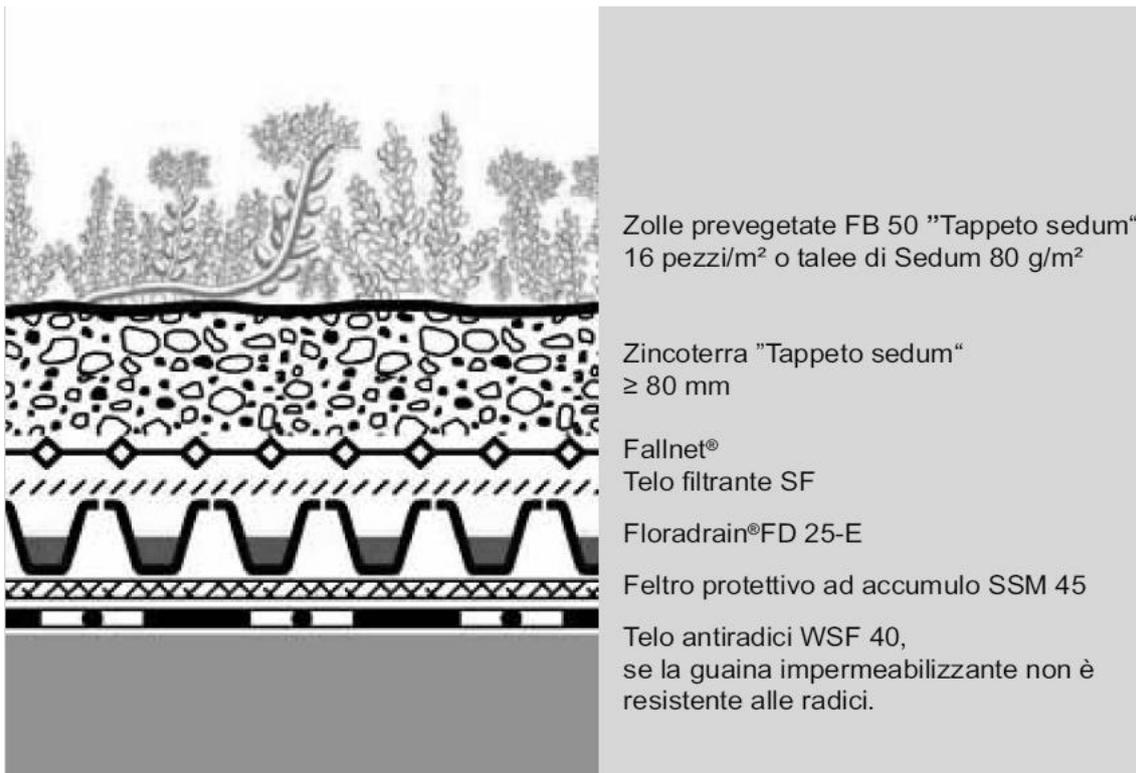


Figura 3.4: Sistema estensivo 'Tappeto Sedum', ZinCo® (10)

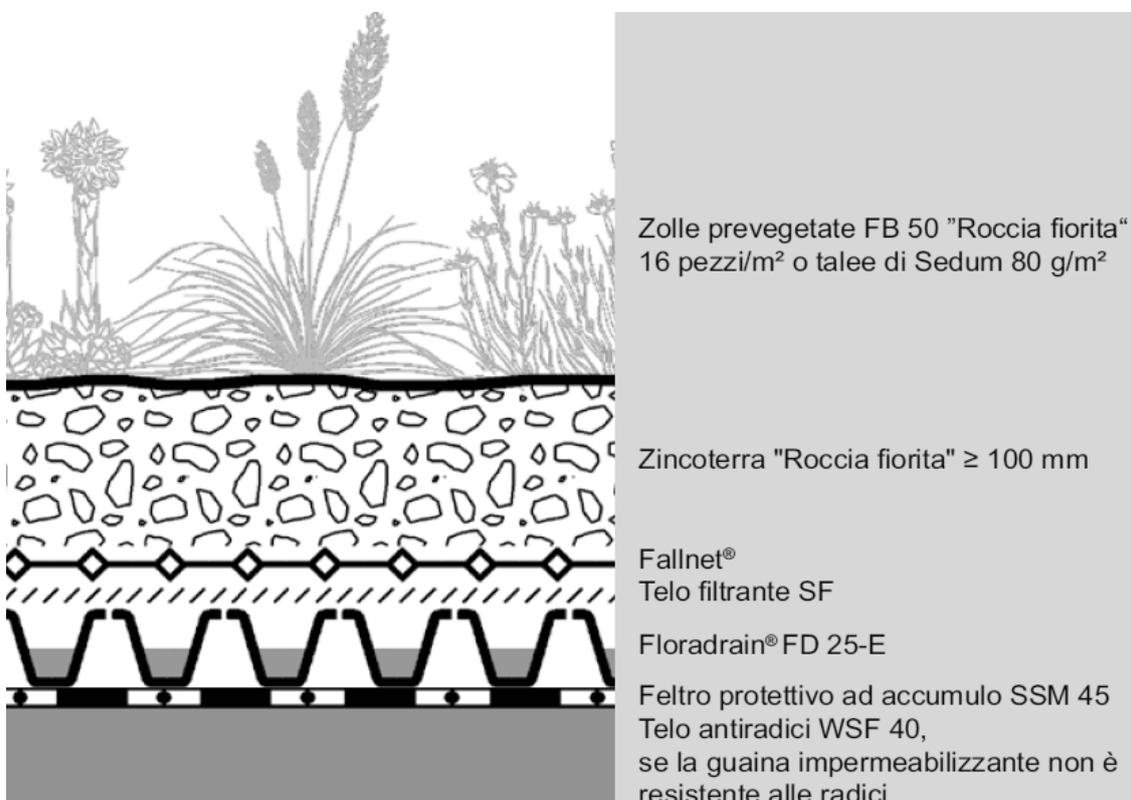


Figura 3.5: Sistema estensivo 'Roccia fiorita', ZinCo® (10)

2) Tetti verdi intensivi

L'intensivo invece rappresenta un giardino vero e proprio, classico, provvisto di prati, cespugli, alberi e elementi di arredo come a terra. È una struttura quindi fruibile ed è l'erede dell'antica tradizione di giardino pensile.

L'inverdimento intensivo viene impiegato per la realizzazione di veri e propri giardini su qualsiasi tipo di superficie pensile: tetti, terrazze e garage.

L'inverdimento pensile intensivo è un sistema che richiede sempre regolare manutenzione (sfalci, irrigazioni, diserbi, concimazioni, ...).

È impiegata un'ampia gamma di specie ed associazioni vegetali: tappeti erbosi, erbacee perenni, cespugli, alberi.

Lo spessore del substrato è superiore a 15 cm e normalmente non supera i 40 – 50 cm pur potendo in casi particolari raggiungere anche i 100 – 150 cm o più (Figura 3.6 - Figura 3.10).

Il substrato impiegato è costituito da una miscela bilanciata d'elementi minerali ed organici, il peso delle stratificazioni in massima saturazione idrica è superiore a 150 – 200 kg/m².

Il costo indicativo medio di un inverdimento intensivo parte da un minimo di circa 60 – 70 €/ m² per le soluzioni più semplici e leggere e può superare i 200 – 300 €/ m² per le soluzioni più pesanti, complesse ed articolate (7).

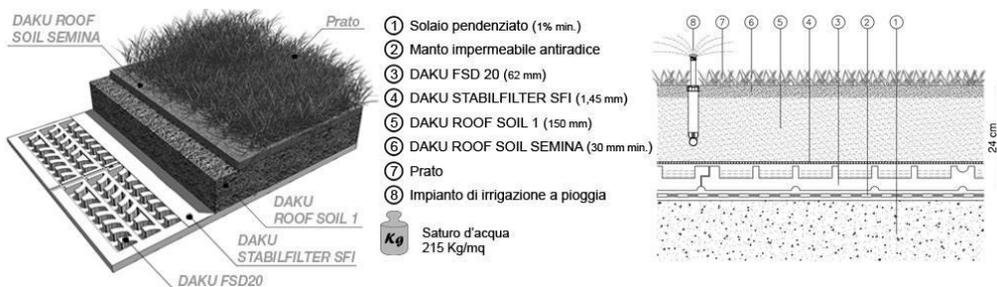
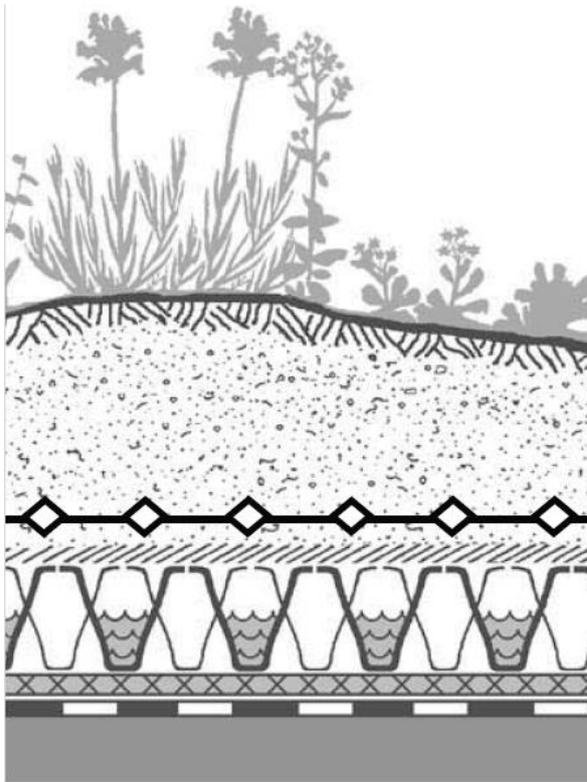


Figura 3.6: tetto verde intensivo leggero, DAKU (8)



Figura 3.7: tetto verde intensivo pesante, DAKU (8)



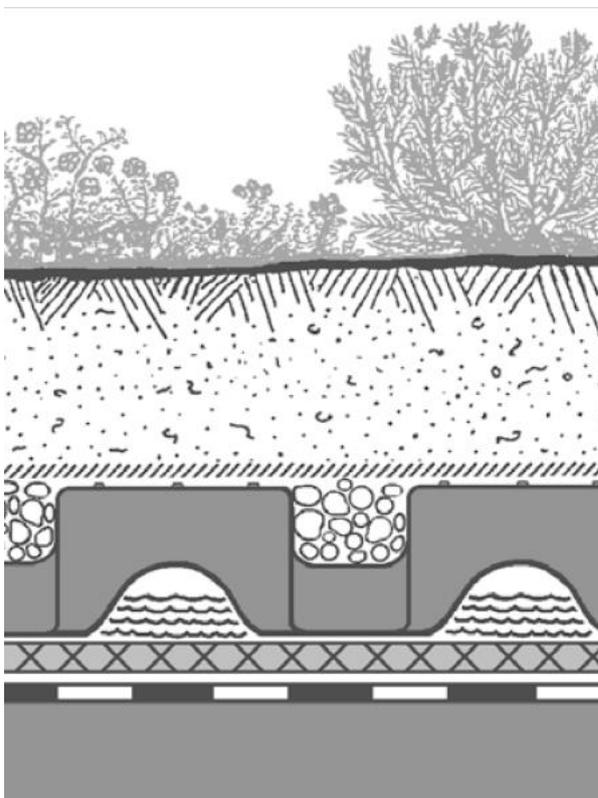
Zolle prevegetate FB 50 "Prato aromatico"
16 pezzi/m²

Zincoterra "Prato aromatico" ≥ 140 mm

Fallnet®
Telo filtrante SF
Floradrain® FD 40-E

Feltro protettivo ad accumulo SSM 45
Telo antiradici WSF 40, se la guaina impermeabilizzante non è resistente alle radici.

Figura 3.8: sistema intensivo 'Prato aromatico' ZinCo® (10)



Prati e piante perenni; con un livello del substrato più profondo, anche cespugli e piccoli alberi

Zincoterra "Giardino pensile"

Telo filtrante SF

Floradrain® FD 60 con riempimento
Zincolit Plus

Feltro protettivo isolante ISM 50

Foglio antiradici WSB 100-PO, se la guaina impermeabilizzante non è resistente alle radici.

Figura 3.9: sistema intensivo 'Giardino pensile' ZinCo® (10)

Per un confronto più immediato tra le due tipologie affrontate si faccia riferimento alla Tabella 3.2.

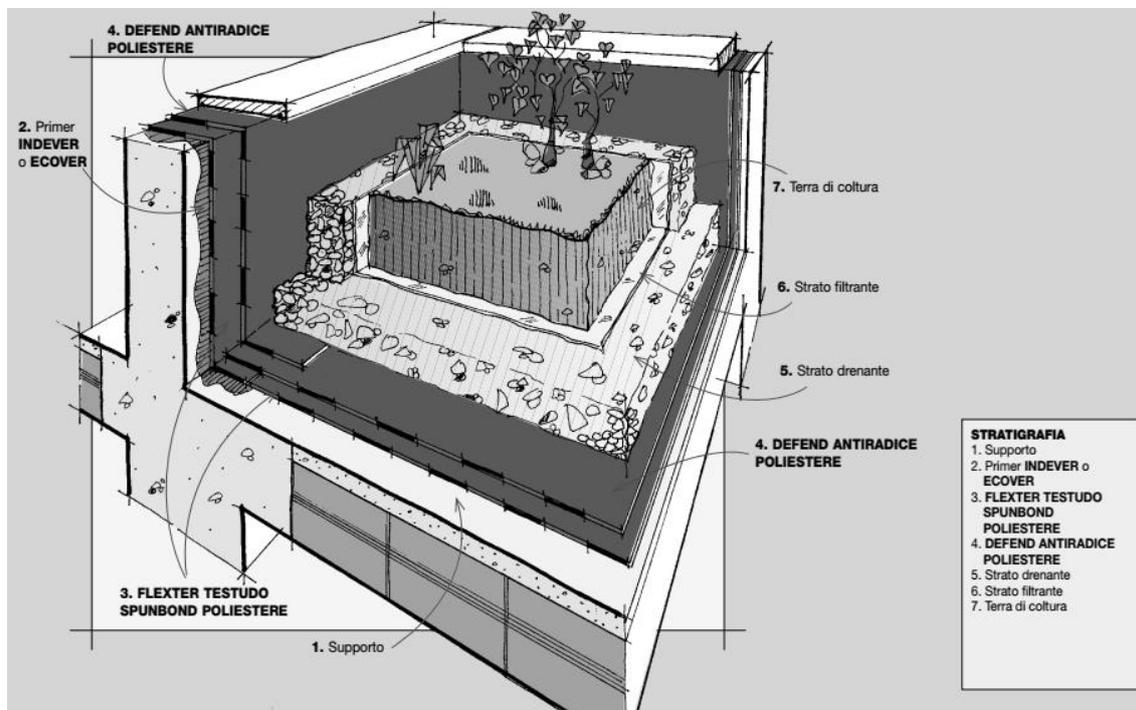


Figura 3.10: tetto verde intensivo, Index S.p.A. (9)

	Bassa manutenzione (sistema estensivo)	Media ed alta manutenzione (sistema intensivo)
Vegetazione impiegata	Piante a sviluppo contenuto in altezza (Sedum, erbacee perenni,...)	Ampia gamma di specie ed associazioni vegetali (tappeti erbosi, erbacee perenni, cespugli, alberi)
Spessore del substrato	8-15 cm	15-40 cm
Peso delle stratificazioni in massima saturazione idrica	75-150 kg/ m ²	>150 – 200 kg/m ²
Costo indicativo medio*	40-50 €/ m ²	60-300 €/ m ²

Tabella 3.2: confronto tra sistema intensivo ed estensivo

* I costi indicati per l'estensivo e per l'intensivo si intendono comprensivi di vegetazione e impianto di irrigazione, a partire dallo strato di protezione meccanica all'impermeabilizzazione compreso. Sono esclusi l'elemento portante, di tenuta e l'isolamento termico.

Inoltre, diverse ditte italiane propongono soluzioni sia intensive che estensive per tetti che presentano anche alte pendenze. Si riportano alcuni esempi (Figura 3.11 - Figura 3.15).



Figura 3.11: sistema inclinato estensivo, DAKU (8)



Figura 3.12: sistema inclinato intensivo DAKU (8)

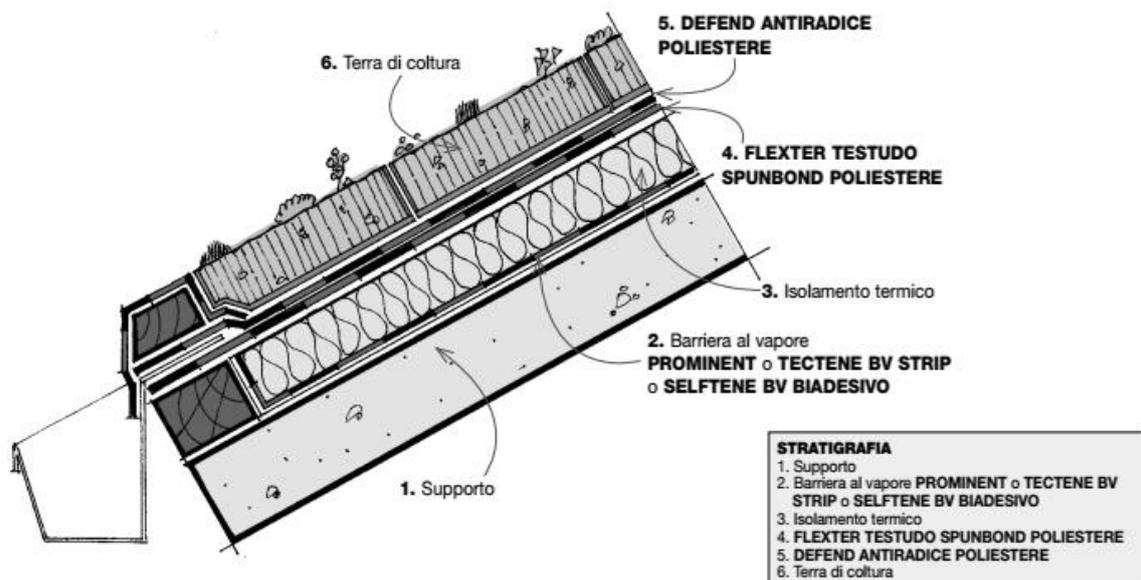
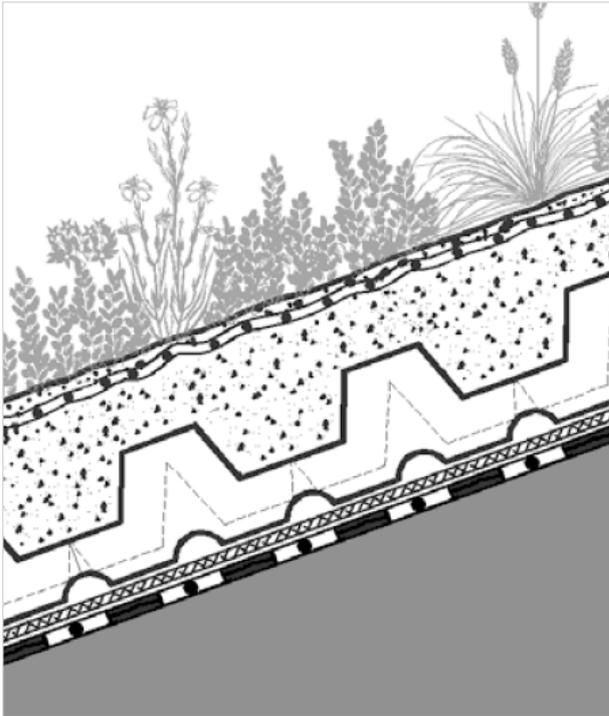


Figura 3.13: tetto verde estensivo in pendenza, Index S.p.A (9)



Zolle prevegetate FB 50 "Tetto inclinato"
24 Pezzi/m²

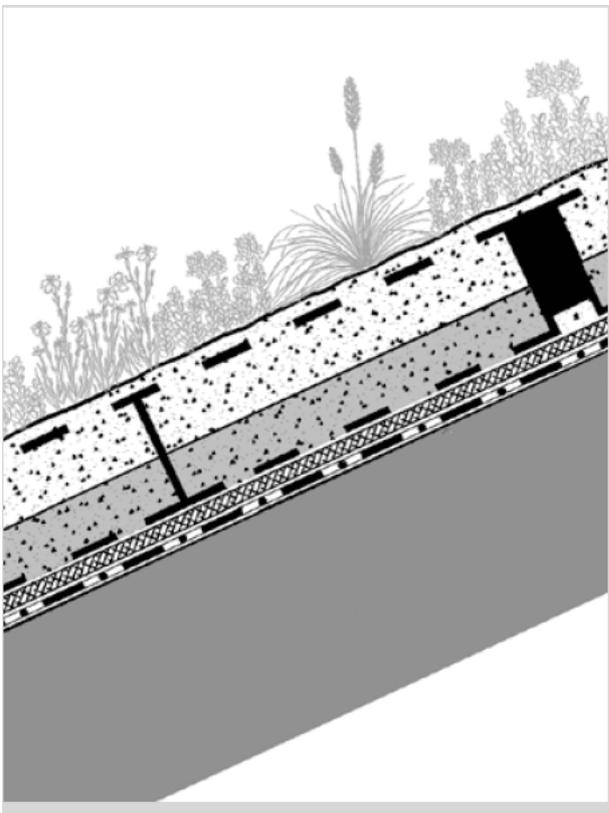
Rete antierosione in juta JEG
(pendenza > 15°)

Zincoterra "Roccia fiorita" quantità / m²
≥ 70 mm sopra l'elemento
Floraset® FS 75

Feltro ad accumulo e protezione
BSM 64

Riciclato
per amore
dell'ambiente

Figura 3.14: sistema 'Tetto inclinato' ZinCo® (10)



Zolle prevegetate FB 50 "Tetto spiovente"
32 pezzi/m² o pannello vegetale "Tappeto
sedum" ≥ 30°

Zincoterra "Prato aromatico light"
(ca. 15 - 20 mm sopra il Georaster®)

Feltro ad accumulo idrico WSM 150

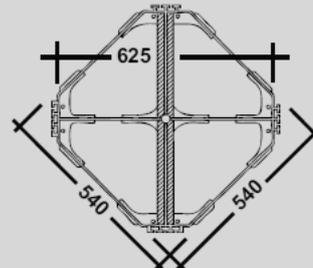


Figura 3.15: sistema 'Tetto spiovente' ZinCo® (10)

3.3 La scelta del verde

Una corretta progettazione delle coperture verdi presuppone un'opportuna scelta delle essenze vegetali. Quest'ultima richiede sia un esame attento della situazione ambientale e microclimatica, sia la conoscenza agronomica e fisiologica della vegetazione.

3.3.1 Fattori che influiscono sulla progettazione del verde

3.3.1.1 Il clima

La conoscenza del *genius loci* è la base indispensabile per coloro che si avvicinano al verde e che lo utilizzano per la progettazione.

Lo studio delle componenti climatiche agenti in un luogo e condizionanti l'anima dello stesso rappresenta il primo passo di una sistemazione a verde ed il progettista può usufruire di molteplici strumenti di supporto, quali ad esempio le carte fitoclimatiche, che consentono di individuare con una certa precisione quale tipo di vegetazione è collocabile in un dato clima (1).

Esistono numerosi modelli, ma qui di seguito s'indicheranno i tre schemi di classificazione più frequentemente impiegati nei testi di botanica ornamentale. Gli schemi proposti sono:

- 1) La classificazione del Pavari
- 2) La classificazione di Koppen-Geiger rielaborata per l'Italia dall'Associazione Italiana di Aerobiologia
- 3) La mappa climatica dell'USDA.

- 1) La classificazione di Aldo Pavari, elaborata nel 1916 ed integrata successivamente da Alessandro De Philippis, si basa su dati termici (temperatura media annua, temperatura media del mese più freddo, temperatura media del mese più caldo, media delle temperature massime estreme, media delle temperature minime estreme) e pluviometrici (precipitazioni annue, precipitazioni del periodo estivo, umidità atmosferica relativa media) e nello specifico suddivide il territorio in cinque zone a seconda della vegetazione forestale (1) (Figura 3.16).

- a. Lauretum: fascia del clima temperato-caldo con piogge concentrate nel periodo autunnale-invernale e con siccità estive. Si estende dal livello

del mare fino ai 200-300 metri sull'Appennino settentrionale, e ai 600-900 metri su quello meridionale e nelle isole. È la zona della "macchia mediterranea", delle sugherete, delle leccete, delle pinete a *Pinus pinea*, *Pinus pinaster* e *Pinus halepensis*. Si possono però distinguere due sottozone: il Lauretum caldo, tipico delle zone più meridionali e costiere, dove si coltivano gli agrumi, il carrubo, il fico d'India, le palme, e il Lauretum freddo, presente in quasi tutta la penisola (anche al nord, nelle zone mitigate dal mare, dai grandi laghi o protette dai rilievi), e caratterizzato da ulivi, lecci, cipressi, alloro, ecc.

- b. Castanetum: le piogge sono meglio distribuite nel corso dell'anno e le siccità estive meno prolungate. Si estende dalla pianura Padana alle zone collinari fino ai 700-900 metri caratterizzate da clima temperato fresco. Via via che ci si sposta verso sud, il Castanetum occupa stazioni ad altitudini crescenti. È la zona delle foreste miste di latifoglie decidue: castagneti, querceti, frassineti, ecc., ma anche pioppeti e saliceti in presso i corsi d'acqua e le zone umide.
- c. Fagetum: contraddistinto da abbondanti piogge, assenza di siccità estiva ed elevata umidità atmosferica. Occupa il piano montano, generalmente attorno agli 800-1200 metri. Sull'Appennino meridionale si spinge a quote maggiori, fino al limite della vegetazione arborea. È la zona tipica delle faggete, in cui crescono anche aceri montani (*Acer platanoides* e *A. Pseudoplatanus*), betulle (*B. pendula*) e pini silvestri.
- d. Picetum: caratterizzato da formazioni boschive e pascoli permanenti., è la zona della fascia alpina, compresa fra i 1200 e i 2000 metri. La formazione forestale tipica è la lecceta, pura o mista con altre conifere (larici, pini, abete bianco).
- e. Alpinetum: occupa la fascia alpina più elevata (dai 1500-1700 m fino al limite della vegetazione arborea). Non sono presenti boschi ad alto fusto e le piante arboree assumono la forma arbustiva per meglio adattarsi ai venti e al peso della neve. I boschi sono radi e costituiti da specie microterme quali larici, pino cembro e montano (lariceti, cembreti, mughete).

2) Secondo lo schema di Koppen-Geiger, l'Italia rientra nell'area del clima mediterraneo di tipo subtropicale con estate asciutta, ma le peculiarità italiane

impongono un'elaborazione più puntuale come quella eseguita dall'Associazione Italiana di Aerobiologia, che suddivide la penisola in regioni climatiche (1) (Figura 3.17). Per ogni regione è riportata la codificazione letterale di Koppen-Geiger.

a. Regioni litoranee ligure-tirrenica, medio adriatica e ionica:

- Temperato subtropicale (CS), indicato nell'immagine in rosso. Interessa le aree più calde di ristrette fasce costiere dell'Italia meridionale ed insulare. Media annua $> 17^{\circ}\text{C}$; media del mese più freddo $> 10^{\circ}\text{C}$; 5 mesi con media $> 20^{\circ}\text{C}$; escursione annua da 13°C a 17°C .
- Temperato caldo (Cs), colorato di arancio in Figura 3.17. Interessa la fascia litoranea tirrenica dalla Liguria alla Calabria, la fascia meridionale della costa adriatica e la zona ionica. Media annua da 14.5 a 16.9°C ; media del mese più freddo da 6 a 9.9°C ; 4 mesi con media $> 20^{\circ}\text{C}$; escursione annua da 15 a 17°C .

b. Regione sublitoranea interna

- Temperato sublitoraneo (Cs), rappresentato in giallo. Interessa le zone collinari del preappennino tosco-umbro-marchigiano ed i versanti bassi dell'Appennino meridionale. Media annua da 10°C a 14.4°C ; media del mese più freddo da 4°C a 5.9°C ; 3 mesi con media $> 20^{\circ}\text{C}$; escursione annua da 16°C a 19°C .
- Temperato subcontinentale (Cf), colorato di verde chiaro nell'immagine sottostante. Interessa parte della pianura veneta, la pianura friulana, la fascia costiera dell'alto adriatico e la peninsulare interna. Media annua da 10°C a 14°C ; media del mese più freddo da -1 a 3.9°C ; 2 mesi con temperatura $> 20^{\circ}\text{C}$; escursione annua da 16 a 19°C .
- Temperato continentale (Cf), rappresentato in verde scura in Figura 3.17. Interessa tutta la pianura padana e parte di quella veneta. Media annua da 9.5 a 15°C ; media del mese più freddo da -1.5 a 3°C ; 3 mesi con media > 20 ; escursione annua $> 19^{\circ}\text{C}$.

c. Regione prealpina e medio appenninica

- Temperato fresco (Cf), colorato in azzurro. Interessa le prealpi e la zona assiale dell'Appennino che talora presenta caratteristiche subcontinentali. Media annua da 6 a 9.9°C ; media del mese più

freddo da 0 a -3°C; media del mese più caldo da 15 a 19.9°C; escursione annua da 18 a 20°C.

d. Regione alpina e alto appenninica

- Temperato freddo (Dw), rappresentato in blu. Interessa una fascia delle Alpi e le aree sommitali dei maggiori gruppi appenninici. Media annua da 3 a 5.9°C; media del mese più freddo < -3°C; media del mese più caldo da 10 a 14.9°C; escursione annua da 16 a 19°C.

e. Regione alpina

- Freddo d'altitudine (H), colorato di viola. Interessa le zone alpine sopra i 2000 m. Media annua < 0; media del mese più freddo < -6°C; media del mese più caldo < 9.9°C; escursione annua da 15 a 18°C.
- Nivale (EF), rappresentato in bianco in Figura 3.17. Interessa la zona delle Alpi oltre i 3500 m con neve perenne.

3) La mappa climatica elaborata dall'USDA (Dipartimento dell'Agricoltura degli Stati Uniti) si basa invece sulla media dei valori minimi annuali di temperatura registrati nei mesi più freddi di diversi anni, evidenziando quindi la resistenza al

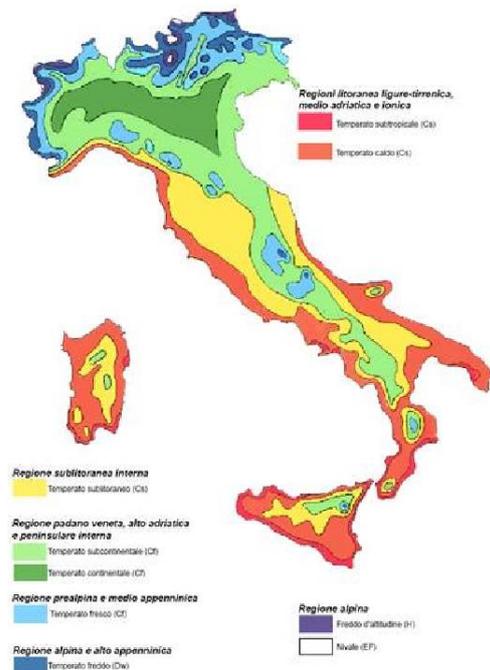
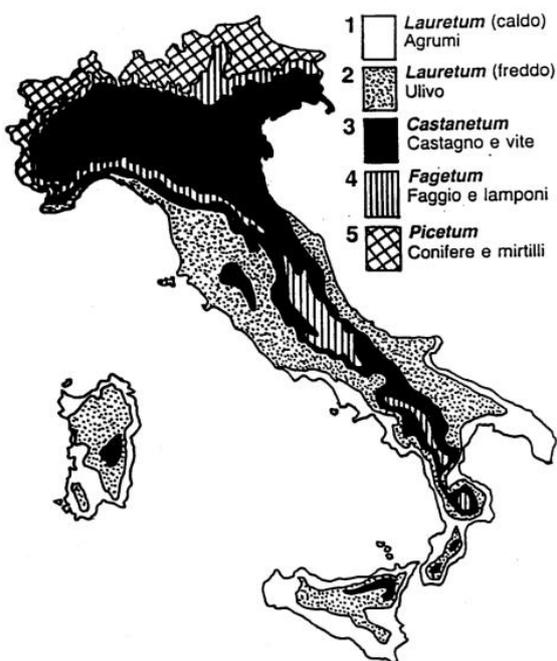


Figura 3.16: fasce fitoclimatiche individuate dal Pavari (www.istitutomedici.gov.it/pof/doc.../520-le-zone-fitoclimatiche-italiane)

Figura 3.17: classificazione operata dall'Associazione Italiana di Aerobiologia (http://digilander.libero.it/meteo_ercolano/clima.html)

freddo delle specie vegetali (1) (Figura 3.18).

È la classificazione più impiegata nei testi anglosassoni, ma non può essere adottata tout court in quanto non prende in considerazione alcuni fattori molto limitanti in Italia, quali la durata del periodo gelivo o comunque freddo, la presenza di nebbie fredde ed umide e la lunga durata del periodo non piovoso cui si abbina una scarsa umidità.

3.3.1.2 La temperatura

Come si è accennato precedentemente, la distribuzione delle specie vegetali è legata alle temperature massime e minime; la sopravvivenza alle temperature estreme è legata alla durata di esposizione, allo stato fisiologico dell'organismo e all'evoluzione di meccanismi di protezione attraverso adattamenti morfologici.

Le temperature sotto lo zero portano al congelamento del terreno, dell'acqua in esso contenuto e di quella conservata nei tessuti vegetali con il seguente deterioramento delle piante. Contro le basse temperature le piante provvedono quindi alla riduzione del contenuto d'acqua, che meno le espone al rischio di congelamento o alla produzione di organi o forme perennanti, bypassando il problema.

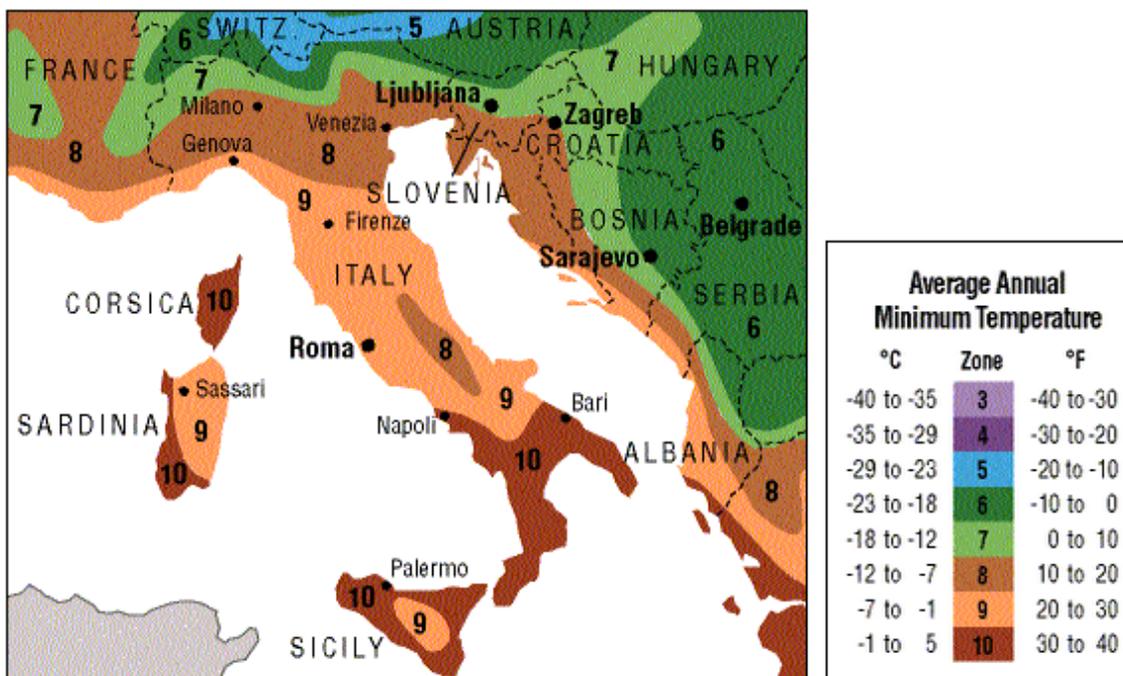


Figura 3.18: mappa climatica relativa all'Italia secondo l'USDA (<http://web.archive.org/web/20080907112129/http://www.uk.gardenweb.com/forums/zones/hze6.html>)

Le alte temperature minacciano la vita vegetale solo nelle zone desertiche e il limite teorico è considerato intorno ai 55°C; infatti il caldo viene combattuto aumentando la traspirazione, qualora vi sia disponibilità di acqua. Le piante autoctone delle zone calde presentano molteplici adattamenti mirati a ridurre la temperatura. Quest'obiettivo per esempio viene raggiunto riflettendo parte della radiazione solare, tramite la formazione di feltri di peli bianchi riflettenti o la presenza di superfici fogliari lucide e laccate.

In funzione degli adattamenti al fattore climatico più avverso, nel 1934 il botanico danese Christen Raunkiær propose una classificazione delle piante superiori in categorie dette forme biologiche, riassumibile in:

- 1) Terofita (T): pianta annuale che sverna sotto forma di semi.
- 2) Geofita (G): pianta perenne che sverna con organi ipogei quali bulbi, rizomi, tuberi, radici su cui si trovano le gemme.
- 3) Emicriptofita (H): pianta erbacea perenne o biennale con gemme a livello del suolo, eventualmente protette dalle parti morte cadute.
- 4) Camefita (Ch): pianta perenne che mantiene la parte aerea e le gemme vicine al suolo, ad un'altezza massima di 20-30 cm.
- 5) Fanerofita (Ph): pianta perenne legnosa con gemme sugli apparati aerei a più di 30-50 cm dal suolo.
- 6) Idrofita (I): pianta perenne acquatica con gemme sommerse durante la stagione avversa.

3.3.1.3 La luce

La luce condiziona la vita vegetale sia per l'intensità con cui giunge sulla superficie terrestre sia in termini di durata: il fotoperiodismo, infatti, è quel fenomeno nel quale la lunghezza relativa del giorno e della notte condiziona il passaggio dalla fase vegetativa alla fase riproduttiva.

Le piante si distinguono in brevidiurne, che fioriscono in condizioni di giorno breve, e longidiurne, che hanno opposte esigenze di fotoperiodo. Infine vi sono le neutrodiurne o indifferenti, la cui induzione alla fioritura è indipendente dalla lunghezza del giorno.

In termini di quantità e intensità luminosa, le piante si suddividono in eliofile (amanti del pieno sole), e sciafile o ombrofile (che prediligono luoghi ombreggiati).

3.3.1.4 L'acqua

La scelta di adottare un regime irriguo o siccitoso è fondamentale per la scelta delle piante da collocare a dimora.

Un inverdimento che non prevede l'impianto di irrigazione necessita di attenzioni particolari nei primi anni, soprattutto se l'intervento mira a comprendere una qualità "estetica". La tipologia di verde è allora necessariamente estensiva e punta all'impiego di miscugli vegetali idonei, formati da *Carex*, *Saxifraga*, *Sedum* e *Sempervivum*. L'impianto inoltre va sorvegliato al fine di eliminare le erbe infestanti fintanto che le specie prescelte non abbiano formato un tappeto compatto.

Gli adattamenti delle piante alla disponibilità di acqua sono molteplici. In generale l'idromorfismo si evidenzia in strutture di fusti e foglie che consentono di assorbire dall'acqua l'anidride carbonica, ossigeno e sali minerali.

Le piante acquatiche, dette anche idrofite, sono in grado di assumere dall'acqua l'ossigeno e l'anidride carbonica necessari per il loro metabolismo, elementi che i vegetali di ambiente terrestre assumono dall'atmosfera; vi sono poi piante acquatiche totalmente sommerse o piante con sole foglie natanti. Le piante plaustri o elofite mantengono in acqua solo l'apparato radicale e le parti inferiori del germoglio. Fra le piante terrestri ve ne sono alcune che, per apporto continuo di acqua dal terreno parzialmente o temporaneamente inondato, vivono in un'atmosfera molto umida: queste sono dette igrofile e vivono in ambienti sempre umidi, per esempio nel sottobosco ombreggiato dei versanti esposti a nord alla nostra latitudine e nelle foreste umide delle zone tropicali. Infine le xerofite sono piante che vivono in ambienti secchi almeno periodicamente e possono sopportare una grande siccità, essendo dotate di apparati per limitare in modo duraturo o temporaneo l'eliminazione di acqua.

Le modificazioni anatomiche adottate dalle piante per resistere alla siccità vanno sotto il nome di xeromorfismo; ne sono un esempio l'allungamento delle radici per raggiungere interstizi profondi del terreno. Le foglie sono piccole e coriacee oppure sempreverdi e l'eccesso di riscaldamento viene limitato dalla disposizione verticale; la superficie dei lembi fogliari è ridotta fino a essere sostituita da piccioli appiattiti. La limitazione delle superfici traspiranti, con riduzione delle foglie fino alla loro scomparsa, comporta un conseguente abbassamento della fotosintesi; questa funzione può essere parzialmente trasferita in altri organi, come il fusto, ove spesso compare il parenchima

fotosintetico. L'evapotraspirazione è limitata al rimpicciolimento degli stomi, approfonditi in cavità protette da feltri e peli.

L'accumulo di acqua nei brevi periodi di precipitazione avviene grazie ai tessuti succulenti presenti nelle foglie (*Sedum*, *Agave*, *Aloe*), nei cauli (*Euphorbia*, *Cactus*) o nelle radici (*Apiaceae*, *Asclepiadaceae*).

Infine è interessante sottolineare che gli stessi adattamenti si riscontrano nelle piante sempreverdi di zone molto fredde come strategie per resistere all'essiccamento da gelo.

3.3.1.5 L'altezza del substrato

Lo spessore del substrato ed il tipo di stratificazione sono fondamentali per fornire un'adeguata aerazione, un accumulo idrico appropriato e lo spazio necessario per lo sviluppo degli apparati radicali delle piante.

È proprio in funzione di questi parametri che è opportuno scegliere la varietà di essenze da allocare sulla copertura. Si parte da spessori minimi di 5-15 cm adatti per le piante grasse fino a raggiungere altezze anche superiori ad 1 m per la disposizioni di alberi (Figura 3.19).

Su tetti dagli spessori del substrato molto esigui (pari a circa 5 cm) le piante più adatte sono quelle dall'apparato radicale molto corto, che sono in grado di resistere anche a condizioni di siccità. Questo genere di copertura tendenzialmente viene scelta per tetti non calpestabili, quindi si opta per piante che implicano una scarsa manutenzione.

Varietà comunemente scelte in questi casi sono il *Sedum* e il *Delosperma* (Figura 3.20)

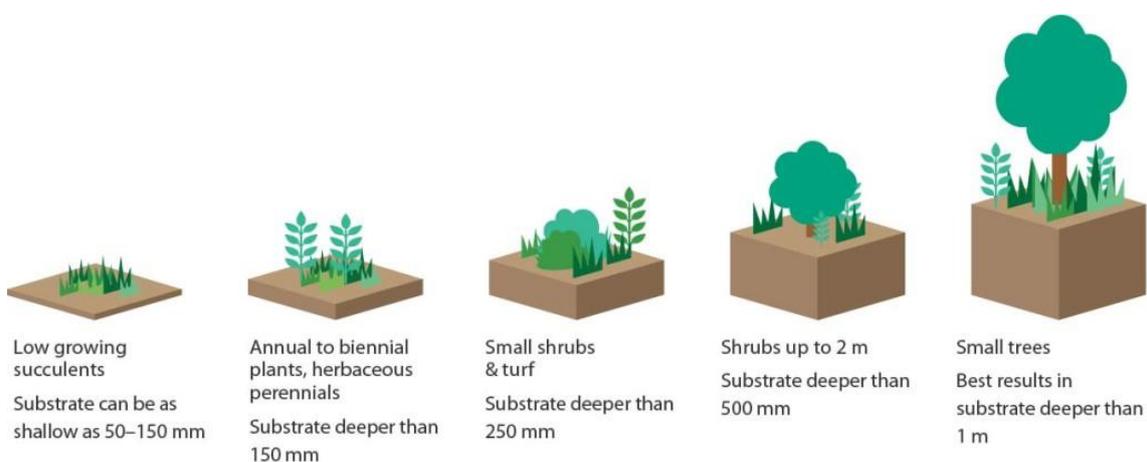


Figura 3.19: scelta della vegetazione in funzione dell'altezza del substrato (11)

Si tratta di succulente che sono in grado di trattenere l'acqua nei periodo secchi e quindi che sono in grado di sopravvivere su un tetto senza irrigazione per 2 o 3 settimane. I *Sedum* si distinguono per una molteplicità di colori, sia nelle foglie che nei fiori, e fioriscono in periodi diversi dell'anno, garantendo una copertura sempre piacevole alla vista.

Con l'approfondimento del substrato ci si apre una gamma più vasta di possibilità.

In un substrato di circa 10 cm crescono tranquillamente diverse specie di erbacee, di *Allium*, di erbe aromatiche e fiori selvatici (Figura 3.21), mentre per altezze superiori ai 15 cm si possono avere erbacee, aquilegie ed astri (Figura 3.22).

3.3.1.6 Particolari necessità

La selezione delle piante può essere effettuata anche in funzione di particolari esigenze come ad esempio la regimazione idrica, la tolleranza alla siccità o determinate prospettive estetiche.

Se un tetto viene progettato per trattenere grandi quantità d'acqua e rimuovere gli inquinanti durante gli eventi di pioggia, è meglio optare per specie che usano l'acqua efficientemente e che accumulano i nutrienti.

Piante erbacee o cespugliose, che usano più acqua rispetto alle succulente, sono delle scelte migliori. Sebbene possa sembrare controintuitivo scegliere delle piante con maggiori bisogni idrici, nel caso di erbacee l'acqua sarà rimossa più efficacemente dal substrato per fare ritorno all'atmosfera. Inoltre, livelli alti di traspirazione garantiscono



Figura 3.20: piante adatte ad un substrato di circa 5 cm. In alto da sinistra: Sedum spurium, Sedum acre and Sedum sitchotense, Sedum album, Sedum reflexum, Sedum acre. In basso da sinistra: Delosperma nubigenum, Sedum acre diploid, Sedum album Athoum, Sedum album Hillebrandtii, Sempervivum "Fame" (12)



Figura 3.21: piante adatte ad un substrato di circa 10 cm. In alto da sinistra: Festuca gautieri, Allium schoenoprasum, Talinum paniculatum, Talinum calycinum, Artemisia tridentata. In basso da sinistra: Bouteloua gracilis, Carex nigra, Phlox subulata, Thymus praecox, Oenothera berlandieri (12)



Figura 3.22: piante adatte ad un substrato maggiore di 15 cm. In alto da sinistra: Allium cernuum, Aquilegia canadensis, Aster oolentangiensis, Liatris aspera, Penstemon hirsutus. In basso da sinistra: Pycnanthemum tenuifolium, Rudbeckia fulgida, Schizachyrium scoparius, Tradescantia ohioensis, Verbena stricta (12)



Figura 3.23: In alto da sinistra: *Dianella revoluta*, *Stypandra glauca*, *Arthropodium milleflorum*, *Sedum pachyphyllum*, *Leonotis leonurus*. In basso da sinistra: *Agastache rugosa*, *Allium nutans*, *Allium tuberosum*, *Bulbine bulbosa*, *Senecio spathulatus*.

un maggiore movimento d'acqua e aumentano l'effetto di raffrescamento dell'ambiente circostante.

È stato dimostrato che piante provenienti da ecosistemi con suoli dai substrati bassi, come nel caso di rocce affioranti, sopravvivono per lunghi periodi di siccità e fanno uso dell'acqua disponibile dopo la pioggia asciugando il substrato colturale. È stato inoltre evidenziato che alcune specie rigermogliano dopo il periodo secco, offrendo una particolare sicurezza in condizioni particolarmente severe. Queste specie includono la *Dianella revoluta*, la *Stypantra glauca* e l'*Arthropodium milleflorum* (Figura 3.23).

Grazie ad un esperimento condotto dal Burnley Campus dell'Università di Melbourne è stato notato come alcune specie di piante grasse (*Sedum xubrotinctum* e *Sedum pachyphyllum*) siano riuscite a sopravvivere alle condizioni estreme dell'estate 2008-09 nonostante il substrato molto basso. Altre specie avevano fallito nelle medesime condizioni, ma sono sopravvissute nelle estati successive più miti e nello specifico queste erano di *Sedum reflexum*, *Sedum mexicanum* e *Sedum spurium* "Schorbuser Blut" (11).

Se anche l'estetica è importante, allora è bene scegliere specie che evolvono durante l'anno e considerare sia il fogliame che la fioritura. Il periodo successivo a quest'ultima richiede particolari attenzioni per via dei fiori secchi e per la presenza dei semi, come nel caso del *Leonotis leonurus*, dell'*Agastache rugosa*, delle specie ornamentali di *Allium* e di *Olearia axillaris*. Un approccio alternativo può consistere nel piantare per strati includendo delle specie dormienti che tollerano la siccità. Possono essere aggiunte alle specie perenni ad esempio delle *Bulbinae bulbosae*, del *Senecio spathulatus* e qualsiasi altre specie basse.

3.3.2 Tipologie di piante adatte ad un tetto verde

3.3.2.1 Piante grasse a crescita lenta

Le succulente, in particolare i *Sedum*, dominano in caso di substrati esigui per i climi temperati dell'Europa e del Nord America.

La crescita lenta in altezza, le abitudini d'accrescimento in orizzontale, l'elevata tolleranza alla siccità ed i fiori stagionali che contrastano con il colore delle foglie li rendono candidati ideali per i tetti verdi.

Alcuni esemplari avranno bisogno d'irrigazione, specialmente nei mesi più secchi dell'anno, ma in caso di una progettazione sprovvista d'impianto d'irrigazione sono comunque tra le piante più adatte.

Le piante grasse dovrebbero essere piantate in modo raffittito (circa 16/m²) per garantire un'adeguata copertura al substrato ed aiutare ad ombreggiarne la superficie.

3.3.2.2 *Erbacee perenni*

Questa categoria include una gamma di piante non boschive, molte delle quali con radici tenaci e steli sotterranei (come rizomi e stoloni) che consentono alla pianta di crescere e resistere per molti anni.

I geofiti (bulbi, cormi e tuberi) costituiscono un altro gruppo di erbacee perenni che possono essere estremamente utili, in particolare in determinate stagioni. La maggior parte dei geofiti primaverili ed autunnali sono dormienti durante l'estate, rivelandosi particolarmente utili nell'ostacolare la siccità durante i mesi più caldi dell'anno. È possibile disporre anche grandi piante grasse dallo sviluppo in verticale, nonostante la loro massa col tempo possa diventare considerevole. Se molte erbacee perenni possono crescere in substrati anche di 15 cm, la necessità d'irrigare per lunghi periodi potrebbe fornire un deterrente alla loro scelta.

Le erbacee perenni più sfruttate per i tetti verdi di Melbourne (Australia), ad esempio, sono quelle originarie dell'entroterra. Sono usate principalmente piante perenni da fiore a scopi ornamentali, così come molte piante autoctone. L'impiego di erbe ornamentali consente la presenza di giochi di contrasti nelle *textures* e nelle forme, ma devono essere potate per essere mantenute in questo stato. Alcune possono avere maggiori necessità di acqua durante l'estate e la formazione di grandi biomasse potrebbe costituire un pericolo per gli incendi (11).

3.3.2.3 *Piante annuali e biennali*

Sui tetti verdi possono essere allocate con successo una vasta gamma di piante annuali e biennali che possono distinguersi in due gruppi.

Per prime si citano le piante annuali a crescita rapida e quelle effimere, in particolare quelle originarie dei climi secchi ed aridi, che possono essere delle aggiunte eccezionali alla vegetazione di un tetto verde, ma necessitano di irrigazioni per lunghi periodi.

I vegetali costituiscono l'altro gruppo principale di piante annuali che è possibile disporre sulle coperture. Questi ultimi richiedono irrigazione e un substrato di almeno 20 cm. Sono necessarie inoltre un'attenta scelta delle piante ed una manutenzione costante per evitare che si trasformino in erbacce.

3.3.2.4 Tappeti erbosi

Alcuni tetti verdi sono stati costruiti specificatamente per ospitare dei tappeti erbosi a scopi sportivi. Per garantire il risultato è necessaria un'attenta selezione delle specie: la superficie ed i requisiti di gioco sono molto più impegnativi rispetto ai comuni manti erbosi.

I tappeti erbosi adibiti a sport necessitano quindi di uno strato colturale per garantire l'efficace drenaggio ed un substrato di almeno 25 cm. Hanno inoltre bisogno di costante irrigazione, fertilizzanti e falciatura per mantenere inalterate le proprie caratteristiche. Su tetti di piccole dimensioni, è meglio evitare specie che crescono eccessivamente, come il *Cynodon dactylon* o il *Pennisetum clandestinum*: i loro rizomi possono diventare invasivi e danneggiare le membrane impermeabili.

3.3.2.5 Piccoli cespugli

È bene che i cespugli di altezza inferiore ad un metro siano ospitati da substrati pari a 25 cm o più.

Piccoli cespugli possono fornire un'ottima copertura e spesso costituiscono la maggior parte delle piante utilizzate per substrati profondi.

Aumentando l'altezza del substrato e l'irrigazione, si aumenteranno anche le specie da poter utilizzare con successo.

È meglio comunque evitare piante eccessivamente vigorose, a meno che non si predisponga una manutenzione sufficiente a gestirne la crescita.

3.3.2.6 Cespugli

Cespugli di altezza fino a due metri possono essere collocati in substrati profondi come minimo 60 cm.

Essi garantiscono schermatura, definizione degli spazi, copertura del terreno e fiori stagionali. Come tutte le altre piante, i cespugli necessitano di una selezione accurata e di un cauto piano di manutenzione. Piante fitte dalla crescita verticale possono essere utilizzate solo in zone poche esposte al vento e necessitano di un'adeguata

protezione. Le siepi avranno bisogno di manutenzioni regolari, includendo potature e la rimozione della biomassa dal tetto.

3.3.2.7 Alberi

Mentre molti piccoli alberi (fino ai cinque metri) possono crescere con successo in substrati profondi 60 cm; profondità di 1 m o superiori garantiscono un migliore risultato.

Gli alberi sono elementi dominanti in qualsiasi paesaggio, ma su un tetto verde generalmente se ne blocca la crescita in favore della larghezza.

Maggiore è l'esposizione del tetto e l'ostilità generale del sito, più importante diventa la selezione iniziale. Alberi con le chiome larghe, steli flessibili ed alta tolleranza al calore sono migliori in aree altamente esposte al vento, nonostante sia necessaria una qualche forma di ancoraggio per gestirli con successo e totale sicurezza.

3.3.3 Sistemi d'inverdimento

In un inverdimento pensile le diverse modalità di posa a dimora della vegetazione si determinano in funzione del tipo di pianta, dei costi e del margine di tempo previsto o imposto per raggiungere un determinato standard.

3.3.3.1 Piantagione

Più le piante sono sviluppate e più difficilmente si adattano alle condizioni della nuova stazione. Bisognerebbe quindi prediligere piante giovani, anche se questo significa non poter godere in tempi brevi di un pronto effetto.

Per inverdimenti intensivi, oppure negli estensivi quando gli spessori sono sufficienti, si possono utilizzare piante legnose o erbacee perenni in vaso o in contenitore. Le piante vengono precoltivate ed i risultati dell'impianto possono essere visibili fin dall'inizio. Importante è che le caratteristiche del substrato iniziale si avvicinino il più possibile a quelle del substrato per l'inverdimento; in caso contrario può accadere che le radici della pianta posta a dimora si sviluppino con difficoltà, tardando ad uscire dalla zolla e a svilupparsi.

3.3.3.2 Talee

Soprattutto le specie di *Sedum* possiedono la caratteristica di radicare in forma di talea. Questa capacità è molto utile e vantaggiosa nell'inverdimento estensivo di grandi superfici. Le talee, che devono essere impiegate in condizioni di assoluta freschezza, vengono distribuite sulla superficie da inverdire, leggermente ricoperte con un velo di substrato e rullate, quindi moderatamente irrigate per alcune settimane.

Con questo sistema le piante adattano gli apparati radicali direttamente al substrato senza i problemi derivanti dalla loro crescita nel substrato del vaso.

3.3.3.3 Semina

La semina trova impiego soprattutto negli inverdimenti pensili intensivi leggeri o in quelli estensivi.

È importante avere la garanzia che i semi siano dotati della necessaria purezza genetica per evitare che dalla germinazione dei semi, in seconda generazione, si sviluppino piante diverse rispetto alla varietà desiderata. Questa garanzia si ottiene usando piante selvatiche, per esempio appartenenti al gruppo delle graminacee o delle perenni.

La semina asciutta si effettua tramite una regolare distribuzione dei semi, seguita da un leggero incorporamento nel substrato di vegetazione. È importante che le specie utilizzate abbiano caratteristiche di germinazione simili. I miscugli per prati aridi sono un tipico esempio di semina asciutta.

Si utilizza invece l'idrosemina quando vengono scelti semi con grandezza e caratteristiche di germinazione diverse. Sul substrato, nello specifico, viene spruzzata una miscela formata da acqua, sementi e collante. Questo tipo di semina è particolarmente adatto per gli inverdimenti estensivi ed è consigliabile per le superfici fortemente inclinate che richiedono una protezione contro l'erosione.

3.3.3.4 Stuoie precoltivate

Sono disponibili in commercio stuoie precoltivate, simili a tappeti erbosi in rotolo, con specie di *Sedum* o anche altre erbacee perenni.

Sono adatte soprattutto per piccole superfici a causa del costo elevato.

Il grado di copertura del 100% è immediatamente raggiunto al termine della posa, perciò questo sistema viene talvolta utilizzato su coperture inclinate oppure quando sia necessaria una veloce consegna a pronto effetto dell'opera.

3.3.4 Progettare in funzione della manutenzione

Al fine di mantenere la copertura a verde sempre efficiente ed in grado di conservare nel tempo quelle caratteristiche tanto ricercate in fase di progettazione, bisogna prevedere anche la sua manutenzione.

L'utilizzo di piante a portamento prevalentemente spogliante condiziona una programmazione fatta di assidui interventi di manutenzione invernali; soprattutto per quei giardini pensili urbani che non sempre offrono una facile possibilità di carico e scarico dei materiali, tutti questi interventi nel tempo possono creare problemi, principalmente di natura economica.

Lo stesso discorso legato alla natura economica è valido anche per l'asporto dei materiali frutto dei tagli periodici dei tappeti erbosi delle coperture a verde.

Nei giardini pensili, per evitare queste operazioni e al contempo ottenere effetti simili al prato, sono stati ottenuti gli stessi risultati negli anni utilizzando perenni a portamento tappezzante discretamente resistenti al calpestio (come *Mazus reptans*, *Timus praecox minor* e *Sagina subulata*) oppure altre essenze particolarmente resistenti collocate in zone ombreggiate o sotto alberature (come *Pachysandra terminalis* e *Convallaria japonica*).

Infine l'impiego di alberature ad alto fusto su coperture a verde può generare nel tempo grandi problemi, poiché talvolta l'ubicazione della copertura rende difficili le operazioni di potatura. Pertanto la mancanza di un controllo costante delle chiome può, sotto l'azione del vento, creare danni agli apparati vegetali, compromettendo gravemente i loro ancoraggi e quindi diminuendo in modo grave la loro stabilità.

4. Benefici dei tetti verdi

I vantaggi globali, di natura economica ed ambientale, legati alle coperture continue a verde sono numerosi e possono contribuire in maniera notevole al miglioramento non solo locale, ma anche collettivo all'interno del tessuto urbano.

In seguito vengono elencati e descritti i principali benefici prodotti dal sistema a verde pensile.

4.1 Regimazione idrica

Data la sempre crescente impermeabilizzazione delle superfici causata dall'edificazione, l'acqua piovana non viene più smaltita attraverso un processo naturale di filtrazione e alimentazione delle falde, ma viene rapidamente convogliata nei sistemi artificiali di smaltimento con evidenti ripercussioni sull'equilibrio idrico (Figura 4.1).

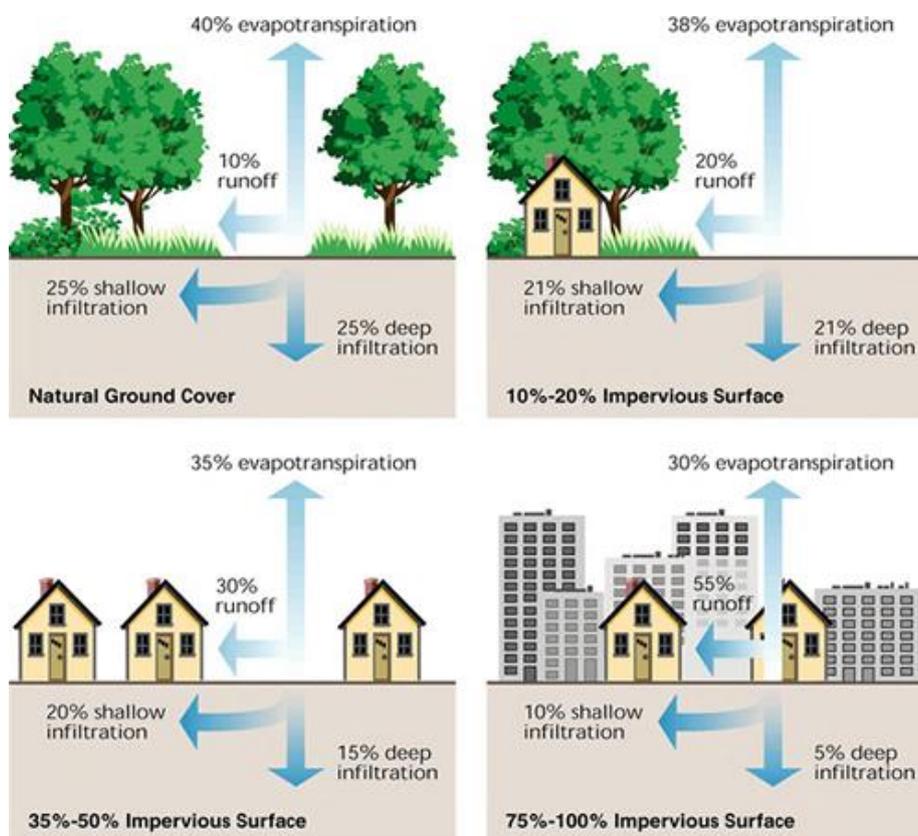


Figura 4.1: relazione tra superfici impermeabili e il deflusso delle acque (www.clearwatermn.org)

Facendo riferimento ad un parametro, detto coefficiente di deflusso, è possibile fare un confronto tra i diversi tipi di superficie. Tale coefficiente, indicato con la lettera greca ψ , rappresenta il rapporto tra l'acqua piovana che viene rilasciata e l'acqua piovana che viene captata in uno specifico lasso di tempo e, quindi, è un valore compreso tra 0 ed 1. In Tabella 4.1 si riportano alcuni valori per diverse tipologie di superficie.

Il verde pensile, grazie all'elevata capacità di accumulo, restituisce in percentuale ridotta l'acqua all'ambiente, fornendo un utile contributo alla regimazione idrica globale. La capacità di regimazione dipende, però, dalle caratteristiche del sistema a verde pensile adottato.

Nello specifico, le caratteristiche del substrato e dello strato drenante sono di fondamentale importanza (Tabella 4.2).

Inoltre, a parità di caratteristiche della copertura, la capacità di regimazione è influenzata dalle peculiarità climatiche del sito. Difatti, a parità di precipitazione media annua, una distribuzione delle piogge più uniforme nell'arco dell'anno e una minor

Tipo di superficie o copertura	Coefficiente di deflusso ψ
Tetti inclinazione > 3°	0.90-1.00
Tetti inclinazione < 3°	0.80
Tetti con zavoratura in ghiaia	0.70
Superfici con piastre	0.70
Superfici di impianti sportivi con drenaggi:	
- In materiali sintetici, tappeto verde sintetico	0.60
- In terra	0.40
- prato	0.30
Asfalto o piastre con fuga sigillata	0.85-0.90
Strade o cubetti di porfido o altra pietra con fuga sigillata	0.75-0.85
Strade e piazzali con cubetti a fuga non sigillata	0.30-0.70
Strade e parcheggi con sottofondo in macadam	0.25-0.60
Strade e parcheggi con sottofondo in ghiaia	0.15-0.30
Superfici in terra (cortili)	0.10-0.20
Giardini, aree verdi e orti	0.00-0.10

Tabella 4.1: coefficienti di deflusso ψ per diverse tipologie di superficie (4)

presenza di picchi concentrati favorisce maggiori prestazioni in termini di regimazione idrica della copertura verde.

Come gli eventi di pioggia diventano più lunghi e meno intensi, l'effetto positivo delle coperture a verde rimane, siccome si registra ancora una significativa riduzione nei picchi di deflusso.

In Germania, ad esempio, si riesce a trattenere tra il 40-100% della pioggia a seconda della stagione: il 75% per le tipologie estensive nel breve periodo, mentre può essere trattenuto fino al 20% per un periodo sino a due mesi (13).

Se s'incorporano quindi i tetti verdi nella progettazione, tutti questi benefici porteranno ad una riduzione dei costi della rete fognaria necessaria a servire le aree in questione. La ritenzione delle acque meteoriche può essere quantificata a partire dai valori di acqua assorbita. Il risultato può essere confrontato con i costi legati all'assorbimento delle acque meteoriche al di fuori della rete fognaria. Tali costi ammontano in media a 15 €/m². Un tetto verde estensivo assorbirà in inverno circa il 54% delle acque meteoriche: il vantaggio economico sarà pertanto pari al 54% di 15 €, vale a dire un minimo di 8.10 €/m² (14).

4.2 Qualità delle acque

Gli inquinanti presenti all'interno dell'atmosfera e provenienti dai tetti possono influenzare la qualità delle acque di deflusso.

Molti studi in Europa e Nord America hanno mostrato come i tetti verdi possano migliorare la qualità delle acque che abbandonano un edificio la cui sommità sia dotata

Spessore della stratificazione (cm)	Inclinazione fino a 15° (ψ)	Inclinazione superiore a 15° (ψ)
50	0.1	-
25-50	0.2	-
15-25	0.3	-
10-15	0.4	0.5
6-10	0.5	0.6
4-6	0.6	0.7
2-4	0.7	0.8

Tabella 4.2: coefficienti di deflusso ψ in coperture a verde pensile in funzione dello spessore e dell'inclinazione (4)

di vegetazione.

A testimonianza di quanto appena asserito si riportano alcuni risultati di una ricerca condotta ad Auckland, Nuova Zelanda, in merito alla qualità delle acque provenienti da tre tetti verdi di tipo estensivo (15).

Lo studio prova che le coperture a verde non sono fonti di NO_x (nitrati o nitriti) o di solidi sospesi, ma evidenzia la possibile espulsione di rame da parte dei substrati dei tetti inverditi. Inoltre si nota che sia il rame che lo zinco sono espulsi dai materiali di costruzione del tetto, piuttosto che dal tetto verde in sé. Tuttavia, siccome il rame può migrare nel suolo ed essere influenzato dai contenuti organici e dai livelli di umidità, è bene che la composizione del substrato del tetto verde ne possieda in basse concentrazioni. Infine si riporta che il fosforo reattivo solubile (SRP – Soluble Reactive Phosphorus) e l'azoto kjeldhal totale (TKN – Total Kjeldhal Nitrogen) sono i principali nutrienti rilasciati in alte concentrazioni da parte dei tetti verdi.

A carattere generale, comunque, il miglioramento della qualità delle acque dipenderà da alcuni fattori, quali:

- La natura del substrato e in particolare il contenuto organico
- Il tipo di vegetazione, ricoprimento ed età del tetto
- I regimi di manutenzione, specialmente se prevedono l'uso di fertilizzanti in modo regolare.

Al giorno d'oggi è anche d'uso comune raccogliere l'acqua proveniente dai tetti verdi, così come accade in nazioni quali la Germania e la Svizzera.

Un esempio di questo comportamento è adottato a Potsdammer Platz (Berlino), dove l'acqua piovana viene interamente riutilizzata in situ sia per irrigare i tetti verdi di tipo intensivo ed il verde limitrofo che per gli scarichi dei WC (13).

4.3 La qualità dell'aria

I tetti verdi contribuiscono alla riduzione di diverse particelle inquinanti e composti, non solo attraverso le piante grazie alla loro capacità di filtrare e di assorbire le polveri e i particolati, ma anche attraverso il minor accumulo di calore da parte delle superfici a verde che comporta un movimento inferiore delle particelle a causa dei moti convettivi localizzati (Figura 4.2).

Le piante riducono l'anidride carbonica presente nell'atmosfera e grazie al processo di fotosintesi producono ossigeno, inoltre rimuovono i metalli pesanti e le particelle volatili operando un'azione di filtraggio.

Difatti le polveri sottili presenti nell'aria rappresentano uno dei maggiori pericoli per la salute; esse possono provocare disturbi cardiaci e l'aggravamento di patologie polmonari.

Allo stato attuale non sono ancora stati stabiliti con precisione i livelli di assorbimento di CO₂ del Sedum, ma il gran numero di piante grasse per m² lascia presumere che il Sedum possieda notevoli potenzialità in questo senso.

Secondo le stime, un tetto verde estensivo assorbe 1.5 kg di polveri sottili per ettaro: un valore che equivale all'incirca alla capacità di assorbimento di un albero adulto. Un tetto verde assorbe pertanto una quantità maggiore di polveri sottili rispetto a un tetto liscio coibentato in bitume senza Sedum. Ciò dipende dalla struttura irregolare della superficie in quanto essa è direttamente proporzionale alla sua capacità di assorbimento (14).

Uno studio condotto a Chicago ha quantificato la rimozione d'inquinamento atmosferico effettuato da parte di un tetto verde (16).

I risultati mostrano che sono stati rimossi un totale di 1675 kg di inquinanti da 19.8 ha di tetti verdi in un anno con una percentuale di O₃ pari al 52%, NO₂ del 27%, PM₁₀ del 14% e SO₂ del 7%.

La rimozione annuale risultante per ettaro di tetto verde è pari a 85 kg ha⁻¹ yr⁻¹.

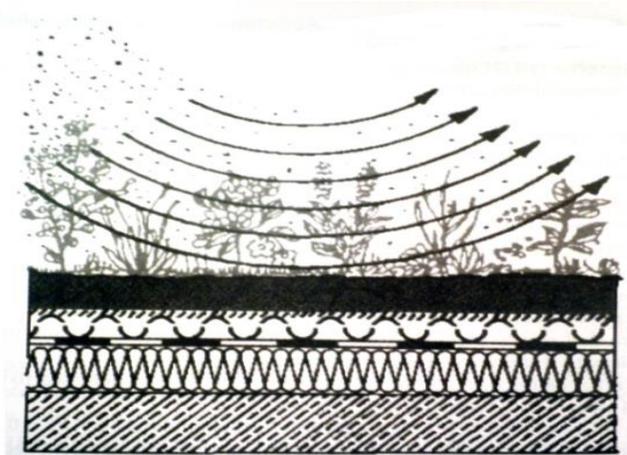


Figura 4.2: trattenimento e filtraggio polveri (7)

4.4 Isolamento termico

Le performance di un tetto verde confrontate con quelle di un tetto tradizionale possono indicare un impatto significativo sul bilancio energetico di un edificio e l'ambiente circostante (Figura 4.3).

Tutto ciò, poi, diventa particolarmente rilevante se un edificio è dotato di un povero isolamento, poiché può portare ad un aumento nell'utilizzo dell'aria condizionata e quindi dei costi energetici.

I giardini pensili rappresentano di fatto un fattore di isolamento termico aggiuntivo sulle coperture, in funzione dei materiali adottati e dello spessore della stratificazione raggiunto, diminuendo la dispersione termica verso l'esterno in inverno, limitando il riscaldamento della copertura in estate e portando benefici nel riscaldamento invernale e nella climatizzazione estiva.

Il conseguente risparmio energetico esercita un benefico influsso anche sull'inquinamento indiretto generato dalla produzione di energia.

Sono stati esaminati alcuni articoli in merito a quanto appena affermato e si riporta a titolo esemplificativo il contenuto di uno di essi, siccome lo studio si colloca a latitudini confrontabili con quelle italiane ed essendo quindi di particolare interesse.

In Grecia, più specificatamente ad Atene, è stato progettato e realizzato un tetto verde sulla sommità di un edificio a destinazione uffici in un'area periferica a nord-est della città.

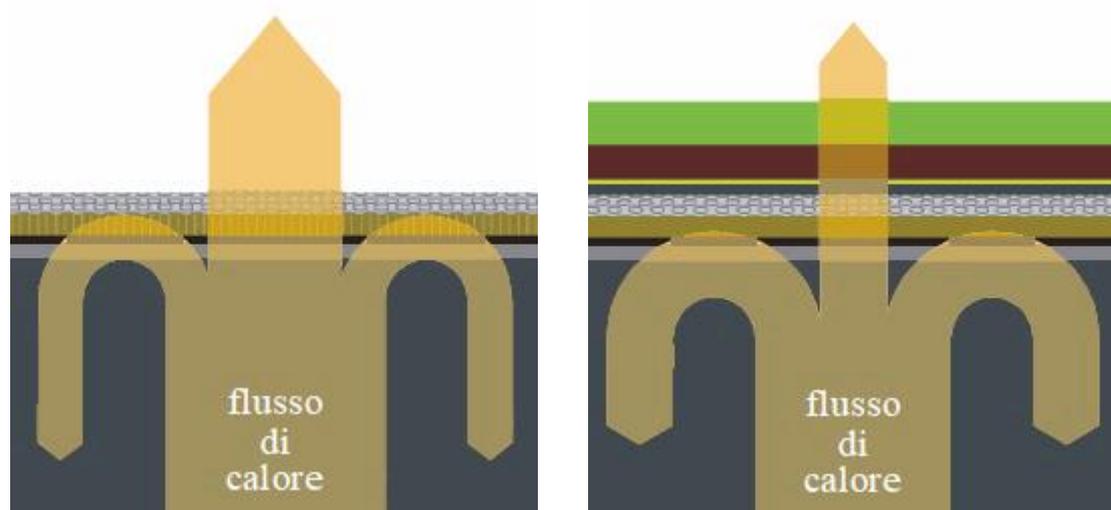


Figura 4.3: andamento qualitativo del flusso di calore per un tetto convenzionale e per uno dotato di copertura a verde (17)

La stratigrafia del pacchetto dall'esterno all'interno dell'edificio comprende:

- Piante locali
- Substrato di terreno di tipo misto
- Sistema di irrigazione
- Lana di roccia
- Geotessile
- Membrana impermeabile di tipo polimerico
- Geotessile

Purtroppo per nessuno degli strati indicati sono riportati i spessori.

In seguito se n'è simulata la performance termica con l'ausilio del software TRNSYS (18).

Gli output del programma sono stati *in primis* il carico termico di raffrescamento per il periodo estivo (Tabella 4.3) e poi il carico termico di riscaldamento per quello invernale (Tabella 4.4).

Per quanto concerne la prima analisi, i valori negativi registrati corrispondono a una diminuzione del carico termico di raffrescamento.

Nel periodo estivo, infatti, viene registrata una riduzione significativa di questo carico e di conseguenza viene osservato un importante risparmio energetico grazie al tetto verde. Nello specifico, la riduzione del carico di raffreddamento per l'intero edificio fluttua tra un 15% e il 39%, mentre per l'ultimo piano raggiunge il 58%.

Month	Cooling load variation (%) for the whole building	Cooling load variation (%) for the last floor
January		
February		
March		
April		
May	-29	-46
June	-39	-58
July	-30	-48
August	-15	-31
September	-16	-27
October		
November		
December		

Tabella 4.3 : variazione del carico di raffrescamento espressa in percentuale per l'intero edificio e il suo ultimo piano (18)

Month	Heating load variation (%) for the whole building	Heating load variation (%) for the last floor
January	1	4
February	-2	-5
March	7	15
April	-6	-14
May		
June		
July		
August		
September		
October	-8	-17
November	3	7
December	5	16

Tabella 4.4: variazione del carico di riscaldamento espressa in percentuale per l'intero edificio e il suo ultimo piano (18)

Per quanto riguarda la seconda analisi invece viene registrato un piccolo aumento di carico per alcuni mesi invernali, così come se ne osserva una diminuzione nei restanti mesi. In particolare, l'aumento massimo del carico termico di riscaldamento si verifica nel mese di marzo ed è pari al 7% per l'intero edificio, mentre per l'ultimo piano il mese interessato è dicembre e il valore arriva al 16%. Inoltre, la diminuzione osservata del carico termico varia tra il 2 e l'8% per l'intero edificio e tra il 5 e il 17% per l'ultimo piano.

Quindi, la variazione nel carico termico di riscaldamento è stata abbastanza piccola e pertanto l'influenza del tetto verde nel periodo invernale non può ritenersi significativa.

Altri studi, invece, hanno mostrato come la temperatura della membrana posta al di sotto di un tetto verde sia inferiore rispetto al caso in cui essa sia esposta agli agenti atmosferici, a prova del lavoro svolto dai giardini pensili al fine di diminuire il riscaldamento della copertura.

Se per temperature medie dell'aria di 0°C/18.4°C (il primo valore si riferisce al periodo invernale e il secondo a quello estivo) la temperatura media di una membrana al di sotto di un tetto convenzionale si aggira attorno a 0.2°C/32°C, per quella al di sotto di un tetto verde la temperatura è di 4.7°C/17.1°C (19). Bisogna comunque sottolineare la correlazione di queste con l'escursione termica giornaliera.

4.5 Influenza sulla durata dell'impermeabilizzazione

Oltre alla protezione dagli sbalzi termici, la copertura a verde protegge dai danni conseguenti agli agenti atmosferici (pioggia, raggi UV, ecc.).

È stato verificato un consistente aumento della vita media degli strati d'impermeabilizzazione sottostanti da quando sono stati installati i tetti verdi sulle coperture; ad oggi si parla addirittura di un raddoppiamento, se non triplicazione della loro durata (13).

Ovviamente tutto questo ha un risvolto anche sul piano economico, in quanto sono necessarie minori manutenzioni e quindi si determina un maggior risparmio da parte degli utenti.

4.6 Isolamento acustico

Il verde pensile agisce sull'inquinamento acustico riducendo la trasmissione del suono all'interno degli edifici, diminuendone la riflessione verso l'esterno.

Le superfici lisce e rigide delle coperture tradizionali riflettono il rumore proveniente dall'esterno; la struttura a verde pensile, al contrario, presenta superfici non omogenee ed è costituita da materiali con caratteristiche di assorbimento acustico (vegetazione, substrati, feltri, presenza di acqua, ecc.) che abbattano la riflessione esterna e grazie alla massa del terreno riducono la trasmissione attraverso le coperture (7).

Il livello di assorbimento acustico dipende dalla tipologia di pacchetto utilizzata ed in particolare dallo spessore del substrato.

Uno studio condotto dalla Kalzip, azienda tedesca con diverse filiali anche in altri paesi, ha confrontato il grado d'isolamento acustico dei propri tetti privi di vegetazione con quelli che ospitavano il sistema 'NatureRoof' e i risultati sono stati (13):

- Tetto standard privo di vegetazione: 33 dB
- Tetto vegetato asciutto: 41 dB
- Tetto vegetato bagnato: 51 dB
- Parete in cemento da 100 mm: 43 dB.

Tale analisi ha evidenziato che un tetto verde può ridurre il suono di 8 dB in più rispetto ad un tetto convenzionale.

Un'altra ricerca condotta dall'Università di Genova, invece, ha posto l'attenzione sulle capacità d'assorbimento del suono da parte degli orizzontamenti a verde pensile sotto il profilo del coefficiente di assorbimento (5).

Il coefficiente di assorbimento sonoro α di un materiale è definito come il rapporto tra l'intensità sonora non riflessa e quella totale incidente su di esso. Il valore numerico del coefficiente di assorbimento rappresenta, quindi, la frazione di energia sonora che viene assorbita e trasmessa da un materiale e può variare fra 0, nel caso in cui tutta l'energia sia riflessa, e 1, nel caso in cui tutta l'energia sia assorbita.

In questo studio sono state analizzate tre tipologie di verde pensile (Tabella 4.5) ed in seguito realizzati dei grafici in merito all'andamento del coefficiente di assorbimento sonoro ad incidenza normale, determinato tramite l'impiego di un tubo ad onde stazionarie, in funzione della frequenza per tutte e tre le tipologie esaminate sperimentalmente.

Sistema intensivo (sistema A)	Sistema leggero (sistema B)	Sistema estensivo (sistema C)	Comune terreno di campo (sistema C)
Feltro di protezione e accumulo Zinco® SSM 45, in fibra di polipropilene per accumulo idrico e protezione con inserto di rinforzo, posato sopra l'impermeabilizzazione antiradice testata FLL. Spessore: ca. 5 mm peso: ca. 470 g/m ² accumulo idrico: ca. 5 l/m ²	Feltro di protezione Peso: 300 g/m ² Spessore: ca. 2 mm		---
Strato di accumulo, drenaggio e aerazione Floradrain® FD 25-E elemento in polietilene riciclato. Spessore: ca. 25 mm	Substrato drenante Lapillo® (materiale granulare) Spessore: ca. 100 mm		---
Telo filtrante Zinco® TG geotessile non tessuto di polietilene-polipropilene incrudito a caldo, ad elevata resistenza meccanica. Spessore: ca. 1 mm	Substrato filtrante: feltro di protezione Peso: 100 g/m ² Spessore: ca. 1 mm		---
Miscela di Zinco® (materiale granulare) con frazione minerale a base di Zincolit®, minerale a base di tegole di laterizio selezionate, frantumate e arrotondate, testata FLL. Spessore: ca. 120 mm	Substrato culturale Vulcaflor® (materiale granulare) Spessore: ca. 200 mm	Miscela di torba neutra (torba di sfagno+Agriperlite) Spessore ca. 150 mm	
Stuoia pre-coltivata d'erba. Spessore terreno: ca. 25 mm Lunghezza media erba: ca. 45 mm	Stuoia pre-coltivata d'erba. Spessore terreno: ca. 25 mm Lunghezza media erba: ca. 45 mm	Stuoia pre-coltivata d'erba. Spessore terreno: ca. 25 mm Lunghezza media erba: ca. 45 mm	

Tabella 4.5: tipologie di verde analizzate (5)

I risultati dell'analisi mostrano che il Sistema A (estensivo) alle frequenze inferiori tra quelle oggetto di misura fornisce migliori prestazioni del Sistema B (intensivo leggero), pur mostrando anch'esso validi risultati; al contrario sulle frequenze più elevate tra quelle misurate risulta preferibile il Sistema B (Figura 4.4).

Si osserva, ancora, che i valori di coefficiente acustico più interessanti nel caso dei sistemi A e B sono ottenuti alle frequenze inferiori.

Poiché lo spettro di frequenza del rumore da traffico urbano (sia prodotto da mezzi leggeri che da mezzi pesanti, sia a basse che ad elevate velocità) è dominato dalle basse frequenze, si ritiene di poter affermare che le due tipologie di verde pensile estensivo ed intensivo analizzate possano contribuire, nello specifico, in maniera notevole all'assorbimento e alla riduzione del rumore ambientale prodotto in ambito urbano.

I risultati dei calcoli dei coefficienti di assorbimento acustico ponderato α_w , definito dalla norma UNI EN ISO 11654 quale parametro di valutazione dell'assorbimento acustico, di ciascun campione sono risultati essere pari a circa 0.45 nel caso del

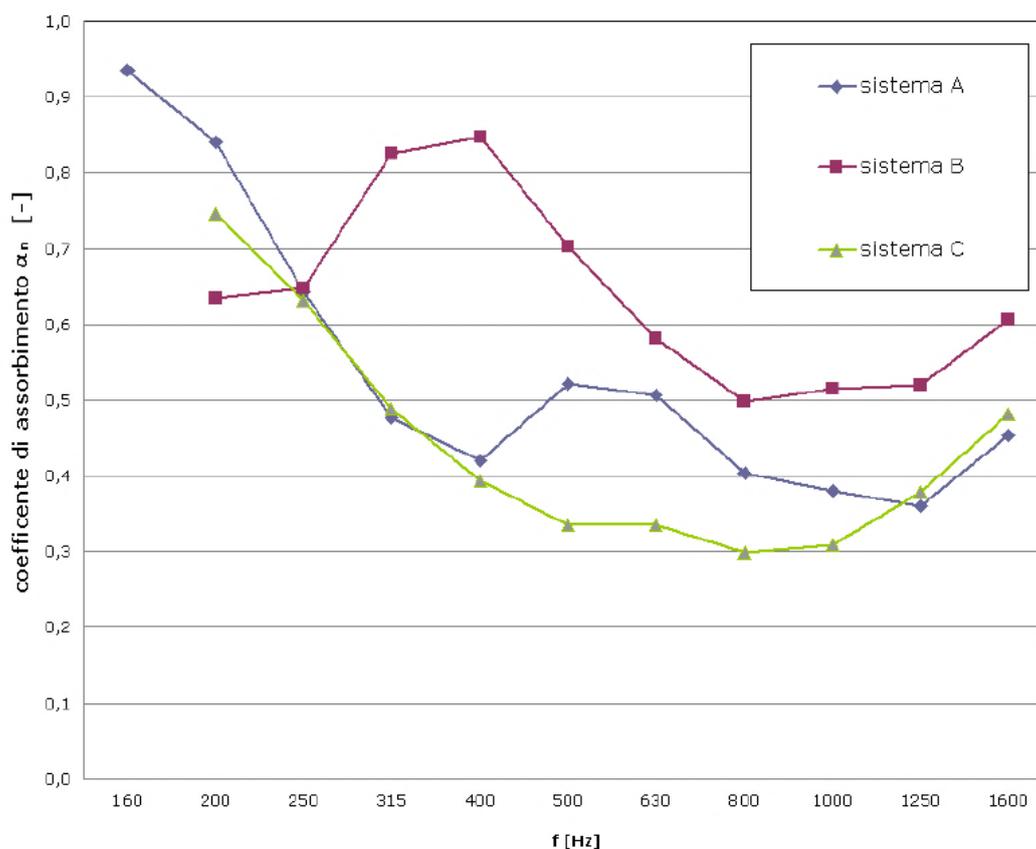


Figura 4.4: confronto degli andamenti del coefficiente di assorbimento acustico ad incidenza normale per le tre tipologie di verde pensile (5)

Sistema A, 0.60 nel caso del Sistema B e 0.40 per il Sistema C; il Sistema B, con uno spessore di stratigrafia maggiore rispetto agli altri due campioni, mostra prestazioni acustiche globalmente più elevate.

Dall'analisi dei diversi andamenti, quindi, si può affermare che il verde pensile presenta caratteristiche di assorbimento del suono significative soprattutto se confrontate con le prestazioni tipiche delle coperture orizzontali tradizionali.

Dall'osservazione dei diversi andamenti del coefficiente di assorbimento acustico e dell'impedenza acustica superficiale, si è potuto constatare che il verde pensile presenta caratteristiche di assorbimento del suono rilevanti.

4.7 Protezione dalle onde magnetiche

Negli ultimi anni si stanno facendo numerose ricerche in merito agli effetti dei tetti verdi per quanto riguarda la protezione dalle onde magnetiche.

Uno studio dell'Istituto per l'Alta frequenza, microonde e tecnica radar dell'Istituto Universitario Militare di Monaco di Baviera dimostra che i tetti verdi con uno spessore di 15 cm assorbono al 99%, e oltre, le onde elettromagnetiche emesse dai ripetitori per i cellulari. Si è scoperto che riduzioni ancora maggiori si ottengono con coperture in argilla e per le frequenze UMTS (5).

Durante una conferenza tenutasi a Praga in merito all'edilizia sostenibile (20), invece, si evidenzia che un tetto verde con 16 cm di substrato reduce la radiazione nel range di 2 GHz, campo nel quale lavorano la maggior parte dei cellulari, di 24 dB, che corrisponde al 99%. In combinazione con uno strato di 24 cm di mattoni spessi in fango porta a una riduzione del 99.999% (Figura 4.5).

Per poter effettuare un confronto, basti ricordare che una normale copertura in tegole riduce il campo delle onde elettromagnetiche solo per il 50%. Si tratta quindi di una prestazione molto interessante ed applicabile in particolar modo sugli edifici collocati in diretta prossimità delle antenne di potenti emittenti e trasmettitori.

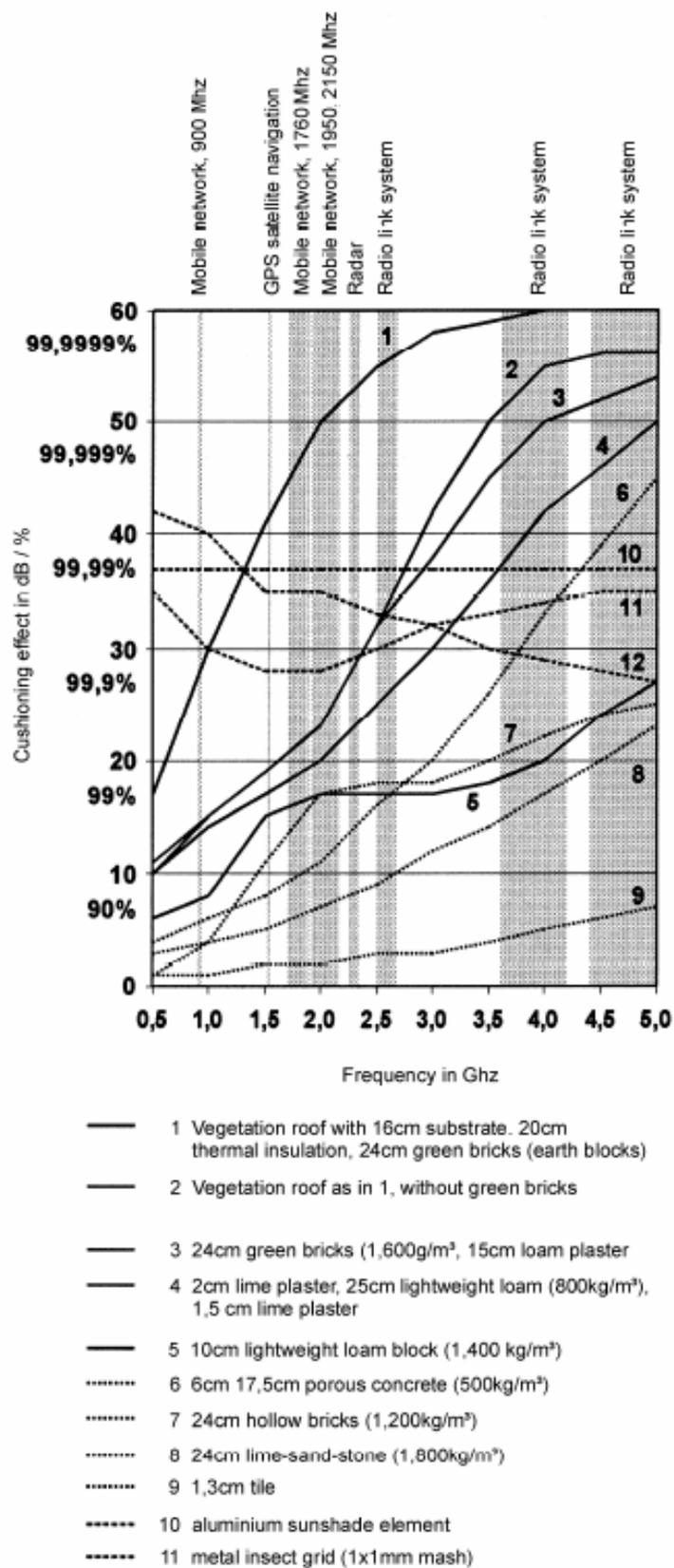


Figura 4.5: effetto protettivo esercitato dai diversi materiali da costruzione nei confronti delle onde elettromagnetiche ad alta frequenza (20)

4.8 Aumento della resa dei pannelli solari

Nonostante giardini pensili e impianti fotovoltaici possano risultare due soluzioni apparentemente antitetiche, l'ubicazione ottimale per un impianto fotovoltaico è proprio su di un suolo green.

Infatti, il grado di efficienza di un pannello fotovoltaico si riduce dello 0.5% per ogni grado di surriscaldamento quando la sua temperatura supera i 25 gradi centigradi.

Un tetto verde si rivela, quindi, essere la scelta ottimale su cui posare un impianto fotovoltaico, poiché è la tipologia di copertura con minor temperatura superficiale possibile.

L'azienda Green Roof Technology ha recentemente lanciato un sistema chiamato "Sun-Roof", che permette di aumentare l'efficienza dei pannelli grazie proprio all'integrazione con le coperture verdi.

Dagli studi condotti dal suo direttore (21) emerge come un *green roof* garantisca ai pannelli fotovoltaici una efficienza aggiuntiva del 3-16%, contribuendo a una maggior redditività dell'impianto stesso.

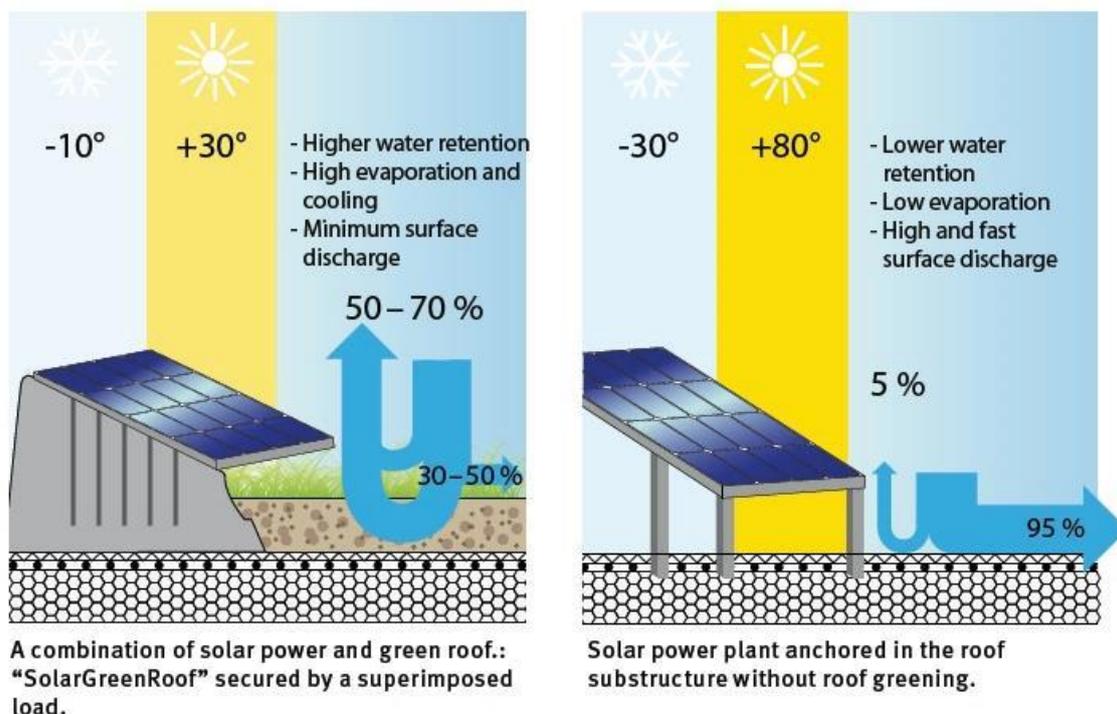


Figura 4.6: confronto tra un pannello solare isolato ed un sistema integrato a tetto verde (21)

4.9 Spazio aggiuntivo

I tetti verdi rendono disponibile uno spazio supplementare fruibile per svariati utilizzi. Che si desideri un giardino rilassante, un'area di gioco, una zona barbecue o anche un campo da golf, tutto è possibile senza l'acquisto di terreni nuovi e costosi.

L'aspetto naturale derivante dall'installazione di un tetto verde, unito ai risultati in termini di risparmio energetico e all'attuale senso di responsabilità crescente verso l'ambiente, per di più determina una rivalutazione dei valori di mercato dell'edificio. L'aspetto naturale di un tetto verde si tradurrà pertanto in un'evidente valorizzazione dell'immobile.

In aggiunta, il valore esercitato dagli spazi verdi per le persone che vivono e lavorano nelle città è stato riconosciuto anche dal Governo britannico (13). Sono difatti stati dimostrati i benefici che apportano gli spazi verdi a livello ecologico, in merito all'addolcimento del paesaggio, come supporto alla biodiversità e anche di aiuto fisico e mentale per i residenti di tali aree.

A tal proposito è stato provato come la connessione con la natura giochi un ruolo fondamentale nel processo di guarigione dei pazienti negli ospedali (22). Esempi di questo genere di attenzioni sono riscontrabili al Civil Hospital di Francoforte (Germania) (Figura 4.7), dove è stato progettato un tetto giardino in corrispondenza del reparto maternità, e al Robert Bosch Hospital a Stoccarda (Germania) (Figura 4.8), dove invece è a disposizione dei pazienti di radioterapia in attesa che cali il tasso di radioiodio dovuto alla cura.



Figura 4.7: tetto giardino del reparto maternità del Civil Hospital, Francoforte (22)



Figura 4.8: tetto giardino a disposizione dei pazienti di radioterapia del Robert Bosch Hospital, Stoccarda (22)

4.10 Biodiversità

Non molte persone associano la sommità dei tetti come habitat per la fauna selvatica, ma se sono disponibili idonee cavità, piante ed animali vi si insedieranno rapidamente e vi stabiliranno delle comunità.

In alcuni casi i tetti verdi sono gli unici luoghi disponibili nelle nostre città. Infatti è di particolare importanza notare che, data l'esistenza di questi tetti, non deve poi essere sacrificato altro spazio.

Il potenziale concernente la biodiversità è stato affrontato, ad esempio, in uno studio condotto a Londra assieme al ruolo della conservazione degli invertebrati e della influenza dell'habitat (23).

Nell'estate e nell'autunno del 2004 sono stati studiati tre habitat differenti: tetti verdi coltivati a Sedum (Figura 4.9), tetti marroni (Figura 4.10) e superfici a verde provenienti da aree industriali da riqualificare (Figura 4.11).

La ricerca si focalizza su tre diversi gruppi d'invertebrati: *Araneae* (ragni), *Coleoptera* (coleotteri) e *Aculeate Hymenoptera* (vespe, formiche e api).

Sui tetti è stata riscontrata un'alta varietà d'invertebrati (Figura 4.12 - Figura 4.13). Almeno il 10% delle specie raccolte sui luoghi oggetto di studio erano segnalate come rare o scarse, in accordo con i criteri stabiliti dall'agenzia Natural England (Figura 4.14).

I dati indicano, quindi, che i tetti verdi e marroni possono essere strumenti importanti per la conservazione degli invertebrati.



Figura 4.9: tetto coltivato a *Sedum* appartenente ad un negozio, Canary Wharf, Londra (23)



Figura 4.10: tetto marrone relativo al Laban Dance Centre, Londra (23)



Figura 4.11: lungo fiume (area da riqualificare), Deptford, Londra (23)

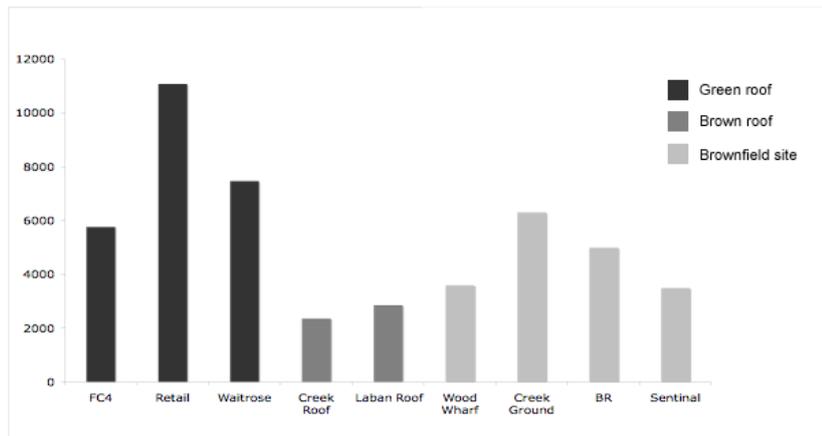


Figura 4.12: numero totale di invertebrati raccolti per ogni area di studio (23)

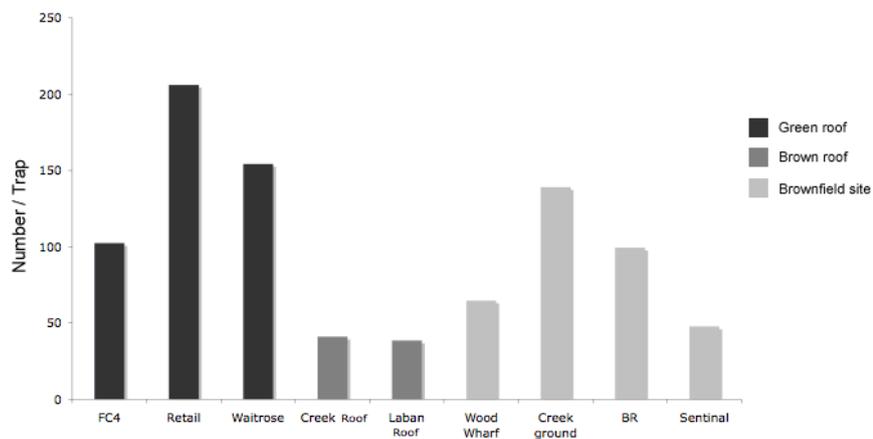


Figura 4.13: numero medio di invertebrati raccolti per trappola (23)

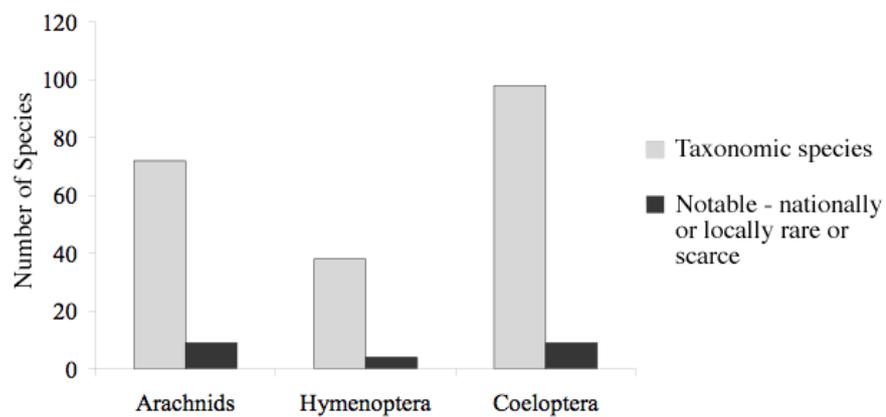


Figura 4.14: numero totale di aracnidi (Araneae), Aculeate Hymenoptera, Coleoptera presenti nel campione, riportato a livello tassonomico e di specie di notevole importanza (23)

4.11 Mitigazione del fenomeno di isola di calore urbana

L'isola di calore urbana è il fenomeno che determina un microclima più caldo all'interno delle aree urbane cittadine rispetto alle circostanti zone periferiche e rurali.

Il maggior accumulo di calore è determinato da una serie di concause tra le quali sono da annoverare: la diffusa cementificazione, le superfici asfaltate che prevalgono nettamente rispetto alle aree verdi, le emissioni degli autoveicoli, degli impianti industriali e dei sistemi di riscaldamento e di aria condizionata ad uso domestico.

Al contempo, le mura perimetrali degli edifici cittadini impediscono al vento di soffiare con la medesima intensità che viene registrata nelle aree aperte fuori della città: gli effetti eolici possono essere inferiori fino al 30% rispetto alle aree rurali limitrofe, limitando così il ricircolo di aria al suolo e il relativo effetto refrigerante durante la stagione estiva (Figura 4.15).

Nelle zone urbane, inoltre, il rapporto tra superfici orizzontali e superfici verticali è più basso; ciò inibisce la dispersione di calore tramite irraggiamento termico.

Trattandosi di un argomento complesso ed articolato, ci si riserva di affrontare una trattazione più dettagliata del fenomeno all'interno del capitolo successivo.

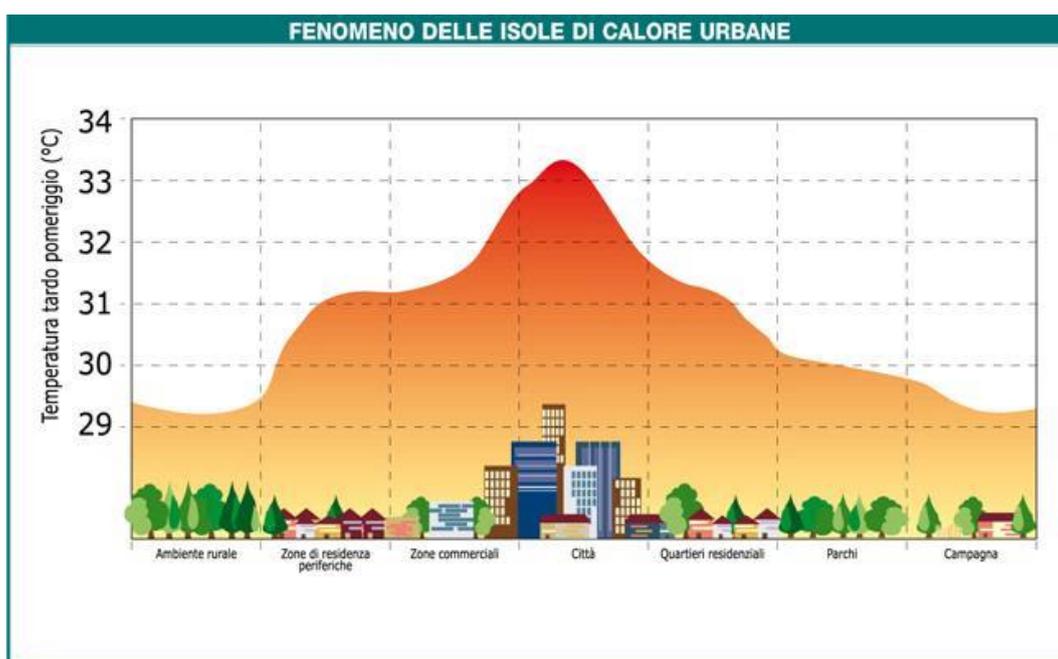


Figura 4.15: fenomeno delle isole di calore urbane (<http://www.meteoweb.eu/2013/01/clima-lisola-di-calore-delle-citta>)

5. L'isola di calore urbana (UHI)

5.1 Isole di calore urbano, cambiamenti climatici e riscaldamento globale

È bene in principio operare alcune distinzioni terminologiche, affinché la trattazione possa procedere con la chiarezza che merita il caso ed evitare così possibili fraintendimenti.

Si definisce isola di calore urbana, o *Urban Heat Island* (UHI), il fenomeno microclimatico caratteristico delle aree metropolitane che consiste in un incremento significativo della temperatura nelle aree urbane rispetto alle zone periurbane e rurali circostanti.

Il riscaldamento frutto delle isole di calore è un esempio di cambiamento climatico locale. Questi differiscono dai cambiamenti climatici a scala globale in quanto i loro effetti sono limitati alla piccola scala e diminuiscono in funzione della distanza dalla loro sorgente. I cambiamenti climatici globali, come l'aumento dell'intensità solare o la concentrazione di gas serra, non sono definiti localmente o a scala regionale.

Il termine 'cambiamento climatico' si riferisce, quindi, a qualsiasi cambiamento delle caratteristiche climatiche, quali ad esempio le temperature, le precipitazioni o il vento, che si manifestano per lunghi periodi di tempo (decine di anni o più).

Questo termine è spesso usato come sinonimo di riscaldamento globale, ma secondo la National Academy of Science "il termine 'cambiamento climatico' sta prendendo il posto di 'riscaldamento globale' in quanto richiama l'esistenza di altri cambiamenti oltre all'aumento delle temperature".

Il riscaldamento globale, infatti, rappresenta semplicemente un aumento della temperatura dell'atmosfera prossima alla superficie terrestre e nel suo strato più basso, il quale può influire sui modelli climatici globali.

Questi tre fenomeni sono chiaramente legati gli uni agli altri, per cui una diminuzione dell'UHI porterebbe anche a migliorare le problematiche legate ai cambiamenti climatici globali.

5.2 Classificazione delle tipologie di UHI

L'UHI può essere classificata a seconda dei profili a cui si fa riferimento verticali all'interno dell'area urbana (Figura 5.1):

- Al di sotto del suolo (*Subterranean UHI*)
- Sulla superficie (*Surface UHI*)
- All'interno dell'atmosfera (*Atmospheric UHI*):
 - Nello strato della copertura urbana (*Urban Canopy Layer UHI – UCL UHI*)
 - Nello strato limite urbano (*Urban Boundary Layer UHI – UBL UHI*).

Le *subterranean* e le *surface UHIs* sono causate prevalentemente dall'irraggiamento e si riscontrano spesso in presenza di superfici impermeabili. Le UCL e le UBL UHIs sono causate invece dal riscaldamento dell'aria e sono di conseguenza meno legate alla presenza di superfici impermeabili. Inoltre, la struttura tridimensionale dell'UCL e della UBL UHI permette al vento di modificarne la forma. Ma vediamole più nello specifico.

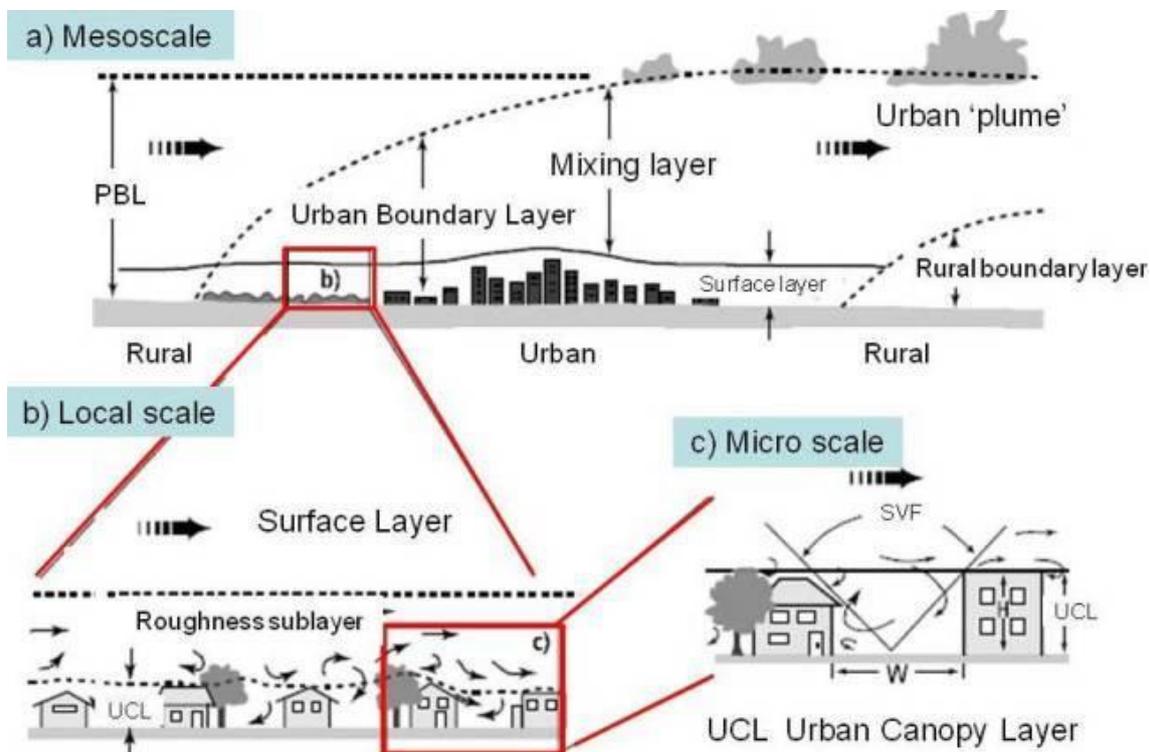


Figura 5.1: strati dell'atmosfera evidenziati in funzione delle diverse scale urbane (<http://www.wageningenur.nl>)

5.2.1 L'isola di calore superficiale

Durante una giornata d'estate caratterizzata da un cielo limpido, il sole riscalda le superfici orizzontali urbane, come le pavimentazioni stradali o i tetti degli edifici: queste superfici, normalmente di basso o nullo contenuto d'acqua, se direttamente esposte, raggiungono temperature di 27-50°C in più rispetto alla temperatura dell'aria dando luogo al fenomeno dell'UHI di superficie (*surface UHI – SUHI*). Per contro, superfici più ricche in contenuto d'acqua, come possono essere quelle delle campagne o dei parchi cittadini, o anche superfici ombreggiate, rimangono sempre prossime alla temperatura dell'aria sovrastante.

Il fenomeno dell'isola di calore di superficie richiede dunque una quantificazione in termini di differenza di temperatura cosiddetta epidermica (*skin temperature*). Questa è generalmente più marcata durante il giorno: il ΔT epidermico, in questo caso, raggiunge valori di media giornaliera di circa 10-15°C. Durante la notte, il ΔT non supera i 5-10°C (24).

Le isole di calore superficiali sono presenti sia di giorno che di notte, ma tendono a essere più evidenti quando splende il sole.

L'intensità della *SUHI* varia con le stagioni in funzione di come cambia l'intensità solare, ma anche in correlazione col tipo di superficie che riveste il terreno ed il meteo. Proprio per quanto appena affermato, s'intuisce come le isole di calore urbano di tipo superficiale siano maggiori durante l'estate.

I ricercatori fanno spesso ausilio d'immagini termiche per individuare e quantificare il ΔT epidermico. Queste vengono ricavate da rilevazioni satellitari o aeree nei canali dell'infrarosso. A seconda della quota e dell'inclinazione, l'immagine comprenderà i contributi di tetti, strade, parcheggi e parchi; con sensori radiometrici posti a quote più basse sarà possibile indagare anche le pareti degli edifici.

5.2.2 L'isola di calore atmosferica

La differenza di temperatura dell'aria, più calda nelle zone urbane, ed in particolare nei centri ad elevata densità abitativa, rispetto all'aria più fresca percepibile nelle zone rurali ad essa circostanti, determina il fenomeno dell'UHI atmosferica.

Come già accennato, i ricercatori sono soliti suddividere l'UHI atmosferica a seconda della quota analizzata. S'individuano quindi:

- L'UHI dello strato della copertura urbana (UCL), come differenza di temperatura dell'aria vicina alla superficie, al di sotto dell'altezza media degli edifici;
- L'UHI dello strato limite urbano (UBL), come differenza di temperatura dell'aria al di sopra dell'altezza media degli edifici, fino alla quota in cui la conformazione urbana non influenza più le caratteristiche atmosferiche.

L'isola di calore dello strato della copertura urbana è sicuramente la manifestazione del fenomeno maggiormente osservata e studiata, in quanto esercita la propria influenza laddove vive la popolazione. Per questo motivo, molto spesso, parlando d'isola di calore urbana, non si accenna neppure alle suddivisioni di cui sopra, dando per scontato che l'interesse sia rivolto al solo UCL.

L'isola di calore atmosferica mostra i propri effetti all'interno di un campo di variazione molto inferiore rispetto all'isola di calore di superficie: su base annua, nelle grandi città, la temperatura dell'aria mantiene valori da 1 a 3°C superiori a quelli dell'aria delle zone rurali. Nei picchi estivi, ma anche durante la stagione invernale in cui il fattore predominante diviene il calore di origine antropogenica, la questione è diversa e l'intensità del fenomeno può raggiungere i 10°C (24).

La letteratura insegna che l'isola di calore atmosferica è meno intensa durante il giorno rispetto a quella notturna. Questa si può, però, estendere in verticale fino alla quota di diverse centinaia di metri e, in orizzontale, sottovento alla città, può arrivare a decine di chilometri di distanza (si tratta del cosiddetto "pennacchio urbano", *urban plume*).

Essa è caratterizzata da aria più turbolenta, più calda, più secca e più inquinata. Lo strato rimescolato assume la forma di una cupola sovrastante la città e può essere di qualche centinaio di metri più spesso rispetto alle aree rurali (Figura 5.2).

Nel tardo pomeriggio ed in serata l'isola di calore atmosferica si sviluppa gradualmente, fino a raggiungere la sua massima intensità durante la notte.

Mentre le aree rurali circostanti si raffreddano per irraggiamento e lo strato superficiale si stabilizza, sviluppando un'inversione termica, l'area urbana, a causa della propria temperatura e degli elementi di rugosità (gli edifici), conserva una turbolenza residua che attenua o annulla la stabilità atmosferica degli strati più bassi, dando vita ad una sorta di strato rimescolato notturno.

Mentre nelle aree rurali l'inversione termica si sviluppa subito dopo il tramonto a partire dalla superficie, nelle aree urbane l'inversione si sviluppa 2-4 ore dopo il tramonto, a quote più elevate; nelle ore successive lo spessore dello strato di inversione cresce, mentre si assottiglia lo strato rimescolato notturno.

Gli effetti del fenomeno dell'isola di calore atmosferica, sia questa dello strato della copertura urbana o dello strato limite urbano, si rilevano con termometri tradizionali posti rispettivamente al di sotto e al di sopra della quota media degli edifici circostanti. I ricercatori tipicamente costruiscono una fitta rete di punti di misura, costituiti da sensori fissi o da sensori mobili (trasportati a bordo di un'auto trasversalmente alla città, per esempio). Con questi metodi di misura (diretti) si ricava una mappa della città sovrapposta ad una serie di isoterme.

5.2.3 Correlazione tra UHI di superficie e di atmosfera

Le due tipologie di UHI appena descritte presentano sì delle differenze (Tabella 5.1), ma è ovvio che tra esse esistano anche delle correlazioni.

Le temperature raggiunte dalle superfici urbane hanno un effetto indiretto ma significativo sulla temperatura dell'aria, in particolare all'interno del *canopy layer*. Qui lo scambio convettivo porta le superfici a scambiare calore con l'aria soprastante, riscaldandola: il fenomeno è direttamente osservabile misurando la temperatura

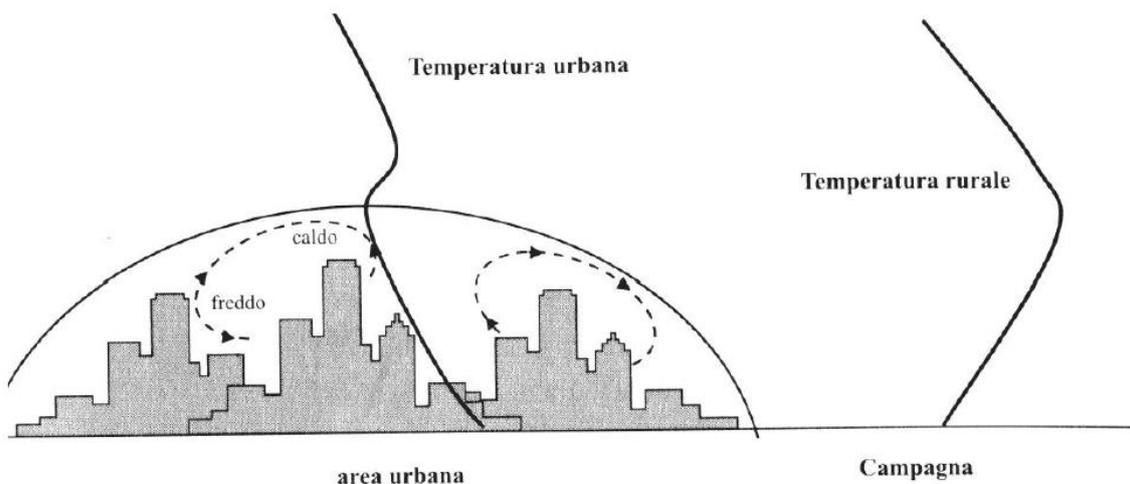


Figura 5.2: profili termici notturnni nell'UHI atmosferica e nell'area rurale circostante (25)

dell'aria che si trovi a lambire parchi o zone ricche di vegetazione. Queste ultime possiedono temperature superficiali inferiori (in quanto sono in grado di raffreddarsi mediante evaporazione) e in corrispondenza di queste si trova aria più fresca.

A causa del continuo rimescolamento dell'aria, la correlazione tra le temperature epidermiche e quelle dell'aria non è costante. Queste ultime, comunque, variano in range inferiori alle temperature superficiali (Figura 5.3, Figura 5.4).

Caratteristica	Surface UHI	Atmospheric UHI
Sviluppo temporale	Presente in ogni momento del giorno e della notte Più intenso durante il giorno e d'estate	Può essere piccola o inesistente durante il giorno Più intensa di notte o poco prima dell'alba e d'inverno
Picco d'intensità (condizioni di UHI più intense)	Maggiore variabilità spaziale e temporale: <ul style="list-style-type: none"> • 10 – 15°C di giorno • 5 – 10°C di notte 	Minore variabilità: <ul style="list-style-type: none"> • -1 – 3°C di giorno • 7 – 12°C di notte
Identificazione tipica	Misurazioni indirette <ul style="list-style-type: none"> • Rilevazioni remote 	Misurazioni dirette <ul style="list-style-type: none"> • Stazioni meteo prefissate • Sensori mobili
Raffigurazione tipica	Termografia	Mappe isotermiche Grafici di temperatura

Tabella 5.1: confronto tra UHI superficiale ed atmosferica (24)

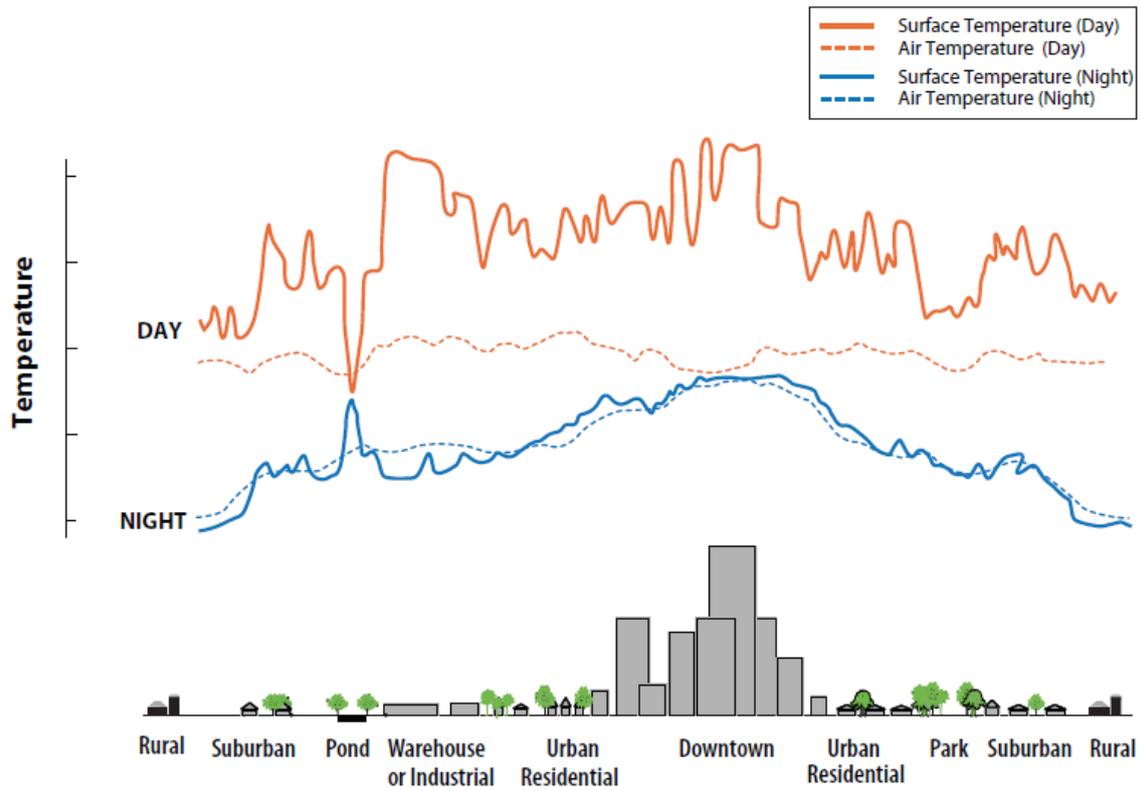


Figura 5.3: variazione della temperatura superficiale e di quella atmosferica (24)

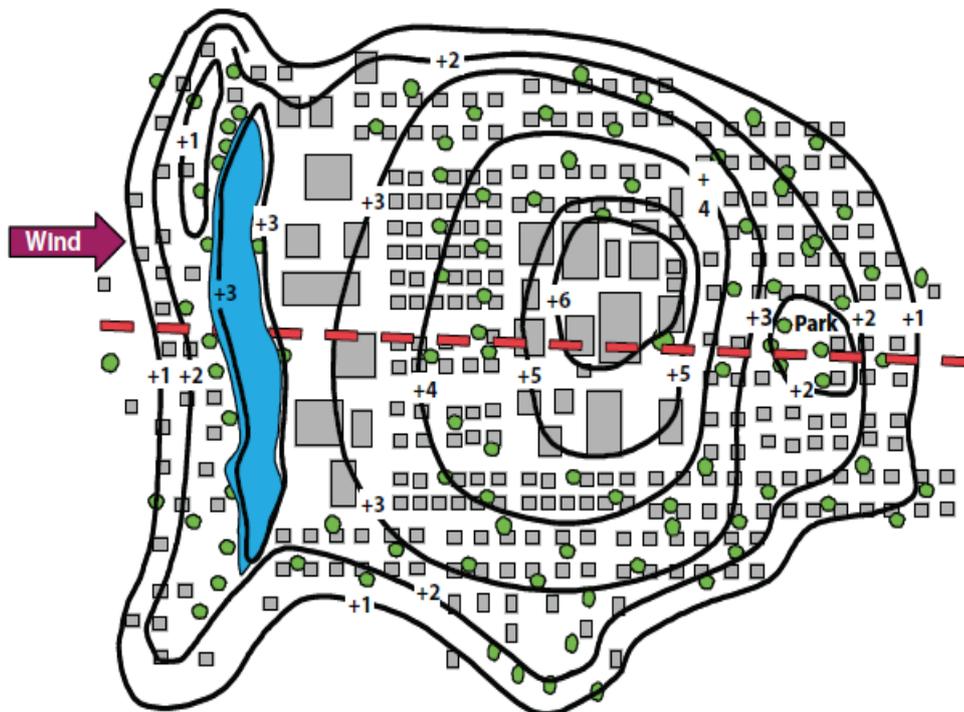


Figura 5.4: mappa delle isoterme che descrivono l'isola di calore atmosferica durante la notte (24)

5.3 Fattori che influenzano l'isola di calore urbana

Le possibili cause che portano alla formazione dell'isola di calore sono state investigate *in primis* da Oke nel 1987 e più recentemente da Rizwan (2009), che all'interno della propria tesi di dottorato (26) propone lo schema indicato in Figura 5.5 dove distingue tra variabili controllabili ed incontrollabili.

Questi fattori, inoltre, possono essere classificati in:

- Variabili dagli effetti temporanei, come la velocità del vento o la copertura nuvolosa;
- Variabili dagli effetti permanenti, come le aree verdi, i materiali scelti per la realizzazione degli edifici e lo sky view factor;
- Variabili dagli effetti ciclici, come la radiazione solare e le sorgenti di calore antropogenico.

La correlazione tra ognuna di queste cause e la UHI è evidenziata in Tabella 5.2.

Si procede ora ad una descrizione più dettagliata di alcuni dei fenomeni appena menzionati.

Fattori	Segno di correlazione con l'UHI
Copertura nuvolosa	-
Velocità del vento	-
Calore antropogenico emesso	+
Rapporto di Bowen, β	+
Popolazione	+
Sky view factor, SVF	-
Rapporto H/W	+
Impermeabilizzazione delle superfici	+
Superfici verdi e specchi d'acqua/area totale	-
Latitudine	+

Tabella 5.2: correlazione tra i fattori che influenzano la UHI e il fenomeno stesso (27)

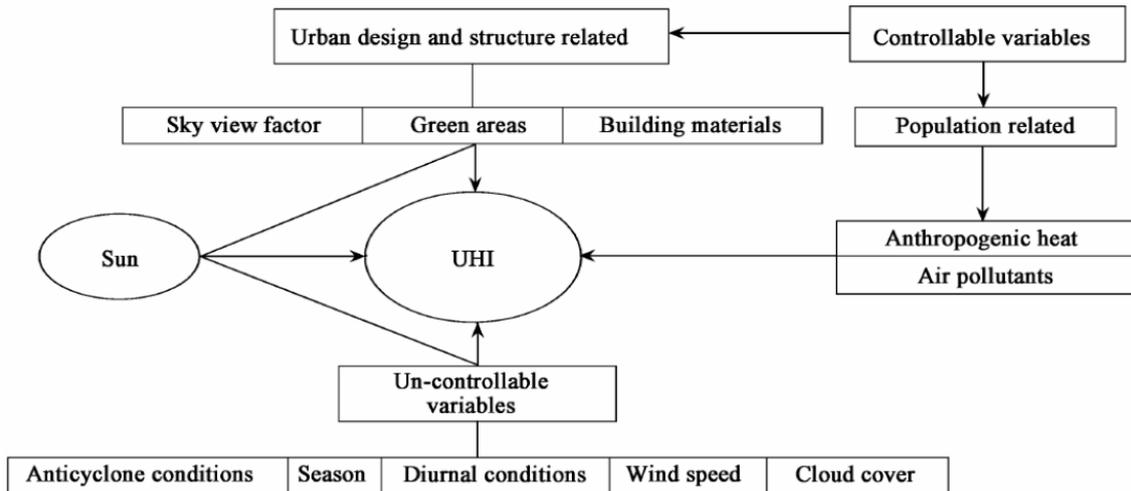


Figura 5.5: classificazione delle cause dell'effetto UHI (26)

5.3.1 Il profilo del vento nelle aree urbane

In assenza di un centro urbano, come in aperta campagna, nello strato superficiale la velocità del vento cresce approssimativamente con il logaritmo della quota (Figura 5.6). Nello specifico, il profilo si discosta leggermente dall'andamento logaritmico in condizioni di stratificazione instabile (convettiva) e stabile (Figura 5.7).

In condizioni neutre l'intensità media del vento segue la relazione:

$$\bar{M} = \left(\frac{u^*}{k}\right) \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)$$

dove:

- u^* rappresenta la velocità di attrito, ovvero l'intensità della turbolenza meccanica originata dall'attrito tra suolo e atmosfera;

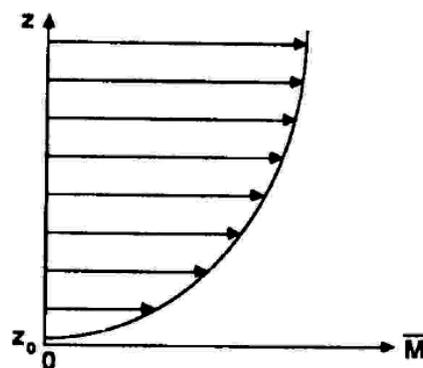


Figura 5.6: tipico profilo logaritmico del vento nello strato superficiale, in condizioni neutre (28)

- k è un coefficiente;
- z rappresenta la quota considerata;
- z_0 indica la lunghezza di rugosità aerodinamica.

Mentre la velocità d'attrito varia a seconda delle condizioni meteorologiche, la lunghezza di rugosità aerodinamica è un parametro statico che dipende dalle caratteristiche geometriche della superficie (Tabella 5.3).

In presenza di un centro urbano la struttura stessa dello strato limite è modificata. Questo sarà chiamato, dunque, lo strato limite urbano (*urban boundary layer, UBL*), come già visto nei paragrafi precedenti.

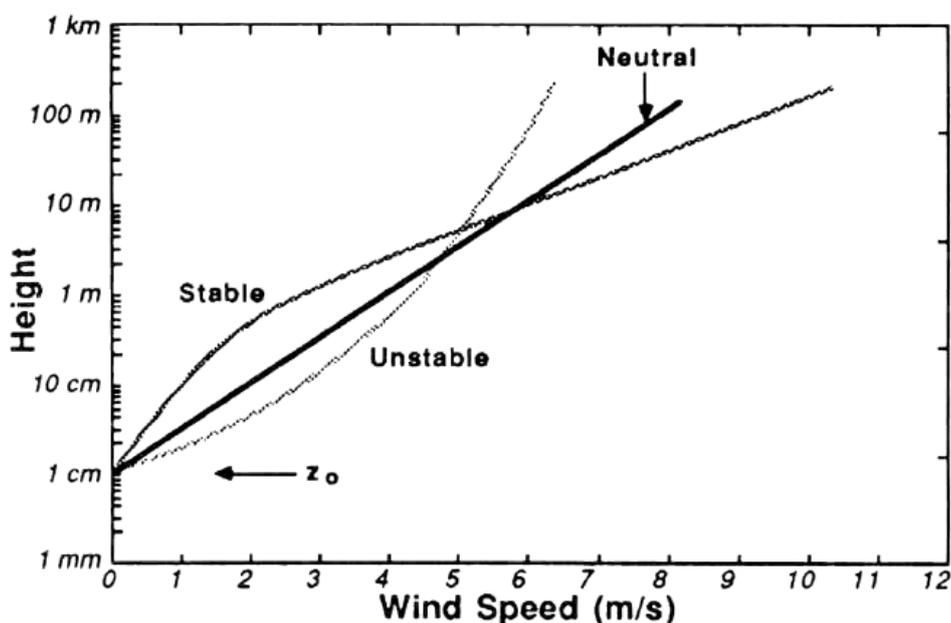


Figura 5.7: Profili del vento in condizioni neutre, stabili e instabili (28)

Copertura del terreno	Valori tipici di z_0
Aree urbane	0.5 – 2 m
Aree suburbane	0.3 – 0.5 m
Foresta	0.5 – 1 m
Terreni agricoli	2 – 10 cm
Terreni erbosi	0.5 – 5 cm
Mare mosso	1 mm
Mare calmo	0.1 mm

Tabella 5.3: Valori tipici della lunghezza di rugosità aerodinamica (28)

Secondo Rotach si possono individuare tre substrati all'interno dell'UBL (Figura 5.8):

- lo strato di copertura urbana (*urban canopy layer, UCL*), già descritto all'interno del paragrafo 5.2.2;
- il substrato di rugosità (*roughness sublayer, RSL*), il quale include lo strato di copertura urbana e si definisce come lo strato in cui il flusso e la turbolenza sono direttamente influenzati dalla presenza di ostacoli (edifici) ed assumono quindi una struttura variabile nelle tre dimensioni; parte dalla superficie e arriva fino ad una quota (z_r nella Figura 5.8) che dipende dall'altezza e dalla densità degli elementi di rugosità; tipicamente, nelle aree centrali di molte città europee z_r è circa il doppio dell'altezza media degli edifici.
- il substrato inerziale (*inertial sub-layer*), al di sopra del RSL, all'interno del quale i flussi turbolenti non risentono dell'effetto locale dei singoli edifici e sono quindi omogenei; il substrato inerziale si estende dalla quota di circa 1/10-1/20 dello spessore dello strato rimescolato.

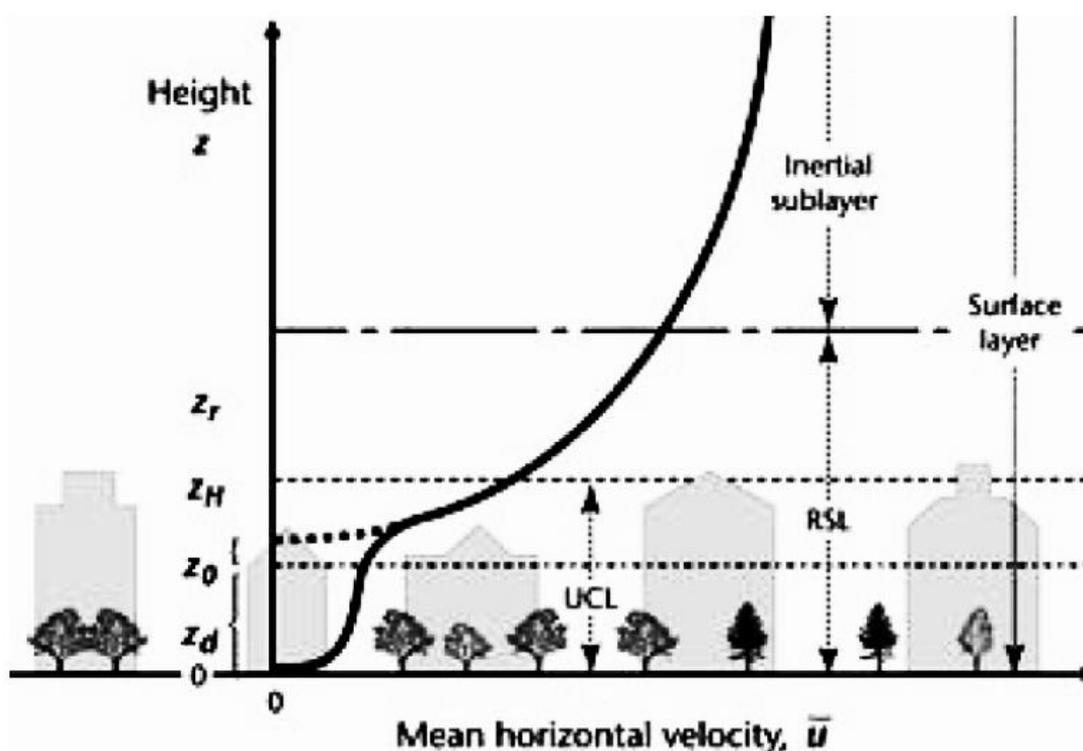


Figura 5.8: profilo del vento idealizzato in un'area urbana (29). La linea spessa continua rappresenta l'andamento della velocità media orizzontale del vento u al variare della quota; la linea spessa tratteggiata rappresenta il completamento del profilo logaritmico teorico in prossimità dei tetti degli edifici; z_d è la distanza di spostamento, z_0 la lunghezza di rugosità, z_H l'altezza media degli edifici, z_r lo spessore del substrato di rugosità.

Le suddivisioni dello strato limite di cui sopra richiedono un aggiornamento della relazione introdotta inizialmente per descrivere il profilo logaritmico del vento.

Difatti, in presenza di una copertura urbana, caratterizzata da ostacoli aerodinamici posti in una struttura compatta (come possono essere gli edifici e gli alberi disposti in un centro urbano), è necessario introdurre un nuovo parametro: la distanza di spostamento z_d , la quale dipende dall'altezza media degli edifici e dalla loro densità.

Se si definisce z_H l'altezza media degli edifici, allora nelle città europee il rapporto z_d/z_H assume comunemente valori compresi tra 0.5 e 0.9 (29).

La relazione che descrive il profilo logaritmico del vento al di sopra dell'altezza media degli edifici sarà così modificata:

$$\bar{M} = \left(\frac{u^*}{k}\right) \ln\left(\frac{z - z_d}{z_0}\right)$$

Come si vede dalla Figura 5.8, al di sotto tale altezza l'intensità del vento diminuisce repentinamente. La conseguenza immediata è uno scarso ricambio d'aria all'interno del *canopy layer* e, quindi, una più alta temperatura atmosferica in caso di scambio convettivo con superfici surriscaldate, un ristagno delle sostanze inquinanti e dell'umidità.

5.3.2 Il bilancio energetico in ambito urbano

L'alterazione degli scambi di calore tra suolo ed atmosfera modifica la temperatura, l'umidità e la stabilità dello strato limite atmosferico; per questa ragione rappresenta uno degli aspetti maggiormente trattati nella letteratura riguardo il fenomeno dell'UHI.

Considerando il bilancio di calore per una superficie di una zona rurale, si può scrivere (30):

$$-Q_S^* = Q_H + Q_E - Q_G$$

in cui, assumendo come positivi i flussi verso l'alto,:

- Q_S^* rappresenta la radiazione netta;
- Q_H il flusso di calore sensibile;
- Q_E il flusso di calore latente;
- Q_G il flusso di calore molecolare dal suolo sottostante.

I flussi di calore hanno segni diversi tra il giorno e la notte (Figura 5.9), inoltre variano in base alla stagione, alle condizioni meteorologiche, al contenuto d'acqua nel terreno, al tipo di suolo e di copertura del terreno.

A mezzogiorno di una giornata soleggiata $-Q_S^*$ è positivo perché la radiazione che proviene dal sole (direttamente o indirettamente) e raggiunge la superficie è maggiore di quella che la superficie riflette ed emette verso l'atmosfera. Q_H e Q_E sono positivi, poiché calore sensibile e umidità sono ceduti dal suolo verso l'atmosfera. $-Q_G$ è positivo poiché la superficie cede calore al suolo sottostante per conduzione molecolare.

Di notte invece $-Q_S^*$ è spesso negativo (il suolo continua a emettere radiazioni infrarosse, anche quando non riceve più radiazioni dal sole). Q_H è negativo, perché l'aria cede calore al suolo (che si raffredda più velocemente). Q_E è negativo, perché l'evaporazione diurna ha ceduto il posto alla formazione di rugiada e brina. Anche $-Q_G$ cambia segno, divenendo negativo: ora è il terreno sottostante a cedere calore alla superficie.

Il rapporto tra il flusso di calore sensibile e il flusso di calore latente si indica col termine 'rapporto di Bowen':

$$\beta = \frac{Q_H}{Q_E}$$

e dipende dall'umidità disponibile nel suolo, dal tipo di suolo e dalla copertura del terreno (Tabella 5.4).

Nelle aree urbane tale rapporto aumenta a causa della scarsa presenza di vegetazione e dell'elevata impermeabilità dei materiali e, di conseguenza, per ridurlo sarebbe

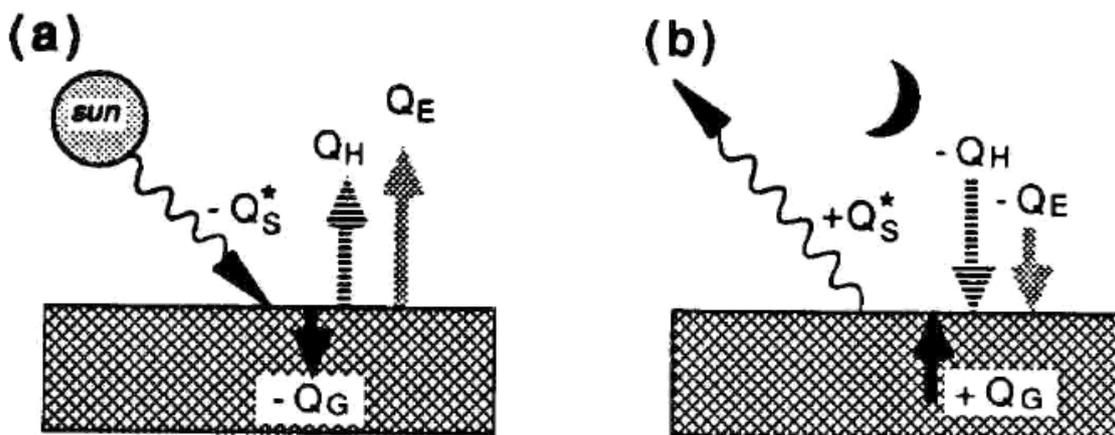


Figura 5.9: i termini del bilancio di calore rispetto alla superficie, di giorno (a) e di notte (b) (31)

consigliabile:

- a) diminuire le pavimentazioni impermeabili in favore di quelle permeabili;
- b) aumentare le superfici vegetate nell'area urbana.

L'aumento della vegetazione urbana avrebbe anche il vantaggio di schermare le superfici sottostanti dalla radiazione solare incidente durante il giorno, riducendone il riscaldamento. Tuttavia di notte potrebbe impedire il raffreddamento radiativo delle superfici, contribuendo all'isola di calore notturna.

Considerando ora il bilancio radiativo della medesima superficie, scriveremo (30):

$$Q_s^* = K \uparrow + K \downarrow + I \uparrow + I \downarrow$$

dove la radiazione netta è considerata come somma di quattro componenti distinte in base alla frequenza d'onda, scomponendole tra quelle indirizzate verso l'alto e verso il basso. Quindi si avrà:

- $K \uparrow$ radiazione solare ad onda corta riflessa dalla superficie;
- $K \downarrow$ radiazione solare ad onda corta incidente (diretta e diffusa);
- $I \uparrow$ radiazione infrarossa ad onda lunga uscente (riflessa ed emessa dalla superficie);
- $I \downarrow$ radiazione infrarossa ad onda lunga diffusa (dall'atmosfera verso la superficie).

E' utile ricordare che la radiazione solare uscente $K \uparrow$ è proporzionale alla radiazione solare incidente $K \downarrow$.

$$K \uparrow = -a \cdot K \downarrow$$

La frazione di radiazione solare a che viene riflessa dalla superficie rappresenta il cosiddetto albedo e dipende dal tipo di copertura del suolo e dall'angolo di incidenza. L'albedo di una superficie è definito più precisamente come la frazione di radiazione solare che quest'ultima riflette, in tutte le direzioni e per tutte le lunghezze d'onda,

Copertura del terreno	Valori tipici del rapporto di Bowen
Regioni desertiche	10
Regioni semi-aride	5
Manti erbosi e foreste	0.5
Terreni erbosi irrigati	0.2
Mare	0.1

Tabella 5.4: valori tipici del rapporto di Bowen in funzione del tipo di terreno (28)

rispetto al la radiazione solare incidente totale su di essa.

Un albedo alto significa quindi che la superficie assorbe poca radiazione e quindi tende ad essere più fredda, mentre uno basso comporta un forte assorbimento di radiazione e quindi di energia. In Figura 5.10 sono illustrati alcuni degli albedo tipici riscontrabili all'interno di un'area urbana, che sono intuitivamente maggiori di quelli in ambito rurale.

Il bilancio appena illustrato si modifica nel caso di un'area urbana come segue:

$$Q_S^* = Q_H + Q_E + Q_G + Q_F + \Delta Q_S$$

dove i due nuovi termini introdotti rappresentano il flusso di calore antropogenico (Q_F) e il flusso di calore immagazzinato nella struttura urbana (ΔQ_S) (Figura 5.11).

Il flusso di calore antropogenico è una sorgente aggiuntiva di calore che deriva dalle attività umane e dai consumi energetici che esse comportano: traffico, riscaldamento, combustione industriale, produzione e consumo di energia elettrica. Esso raggiunge valori medi annui compresi tra 15 e 50 W/m² nelle aree urbane delle nostre latitudini, e mostra ciclicità diurne e stagionali, con valori più alti di giorno e in inverno.

Per ridurre tale flusso si possono:

- a) ridurre i consumi di energia elettrica;
- b) diminuire il traffico veicolare;
- c) ridurre i consumi per il riscaldamento domestico.

Il flusso di calore immagazzinato compare anche nel bilancio energetico delle superfici coperte da boschi e foreste, ma nelle aree urbane assume valori significativamente più alti. Esso, infatti, dipende dai materiali e dalla geometria della struttura urbana, ma

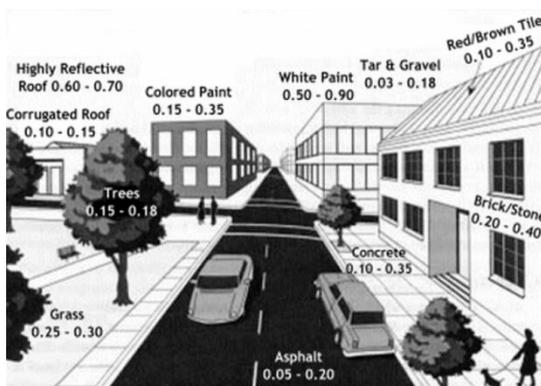


Figura 5.10: albedi urbani (25)

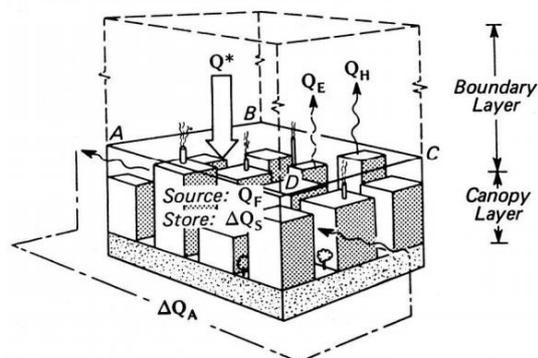


Figura 5.11: schema relativo al bilancio energetico urbano (29)

soprattutto dalla densità di edifici.

In prima approssimazione è possibile esprimere ΔQ_S come una funzione della frazione di spazi verdi λ_V e della frazione di aree edificate λ_P (si vedano la Figura 5.12 e la Figura 5.13 per le rispettive definizioni):

- di giorno:

$$\Delta Q_S = (0.20\lambda_V + 0.33\lambda_P)Q^* + 3\lambda_V + 24\lambda_P$$

- di notte:

$$\Delta Q_S = (0.54\lambda_V + 0.90\lambda_P)Q^*$$

Per ridurre tale flusso è consigliabile:

- modificare la geometria degli edifici;
- selezionare opportunamente i materiali utilizzati (privilegiando quelli a minore ammettenza termica, cioè ad esempio migliorando la coibentazione degli edifici).

Generalmente, l'azione a) può essere molto più efficace della b), ma è probabilmente anche di più difficile realizzazione.

5.3.3 L'effetto canyon e lo sky view factor

Nonostante ogni città presenti un proprio assetto geometrico, è possibile individuare un'unità geometrica urbana presente in maniera diffusa: il *canyon* urbano. Il canyon consiste nella combinazione di due superfici verticali e di una orizzontale ed è formato tipicamente da due edifici adiacenti e da una strada situata tra di essi (Figura 5.14).

La geometria del canyon influenza il bilancio energetico urbano in vari modi: aumenta la superficie esposta ai processi di scambio, complica l'ingresso della radiazione solare, determina un'interazione tra le superfici che lo compongono, limita la capacità

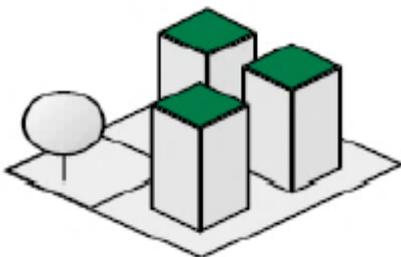


Figura 5.12: l'indice d'area piana degli edifici λ_P (evidenziato in nero) rappresenta il rapporto tra l'area piana coperta da edifici e l'area piana totale **(32)**

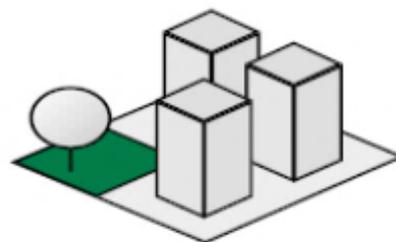


Figura 5.13: l'indice d'area piana della vegetazione λ_V (evidenziato in nero) rappresenta il rapporto tra l'area piana coperta da vegetazione (e talora da terreno nudo) e l'area piana totale **(32)**

di dispersione della radiazione infrarossa ad onda lunga e limita la turbolenza dell'aria.

Se il canyon è molto largo, quello che si nota è la presenza del normale vortice sottovento ad un edificio isolato e ciò ha luogo quando, dette H l'altezza dell'edificio e W la sua larghezza lungo la direzione del vento, $H/W < 0.4$.

Le cose si complicano quando H/W aumenta fino a 0.7 perché gli edifici cominciano a interferire gli uni con gli altri, dando luogo a un debole disaccoppiamento fra l'aria che scorre al di sopra degli edifici e l'aria tra di essi (Figura 5.15).

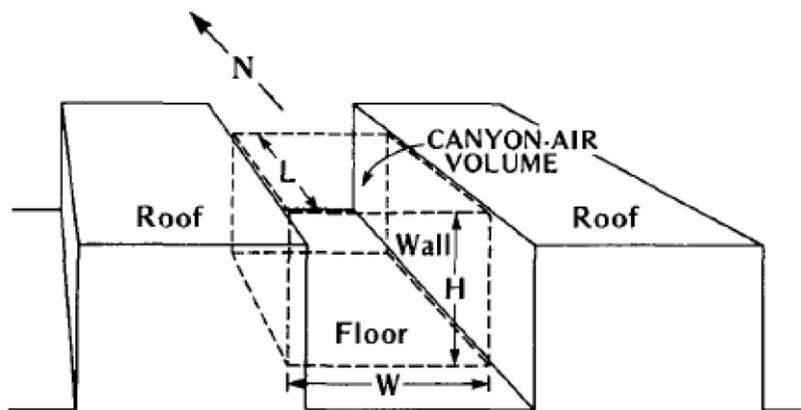


Figura 5.14: rappresentazione schematica di un canyon urbano (31)

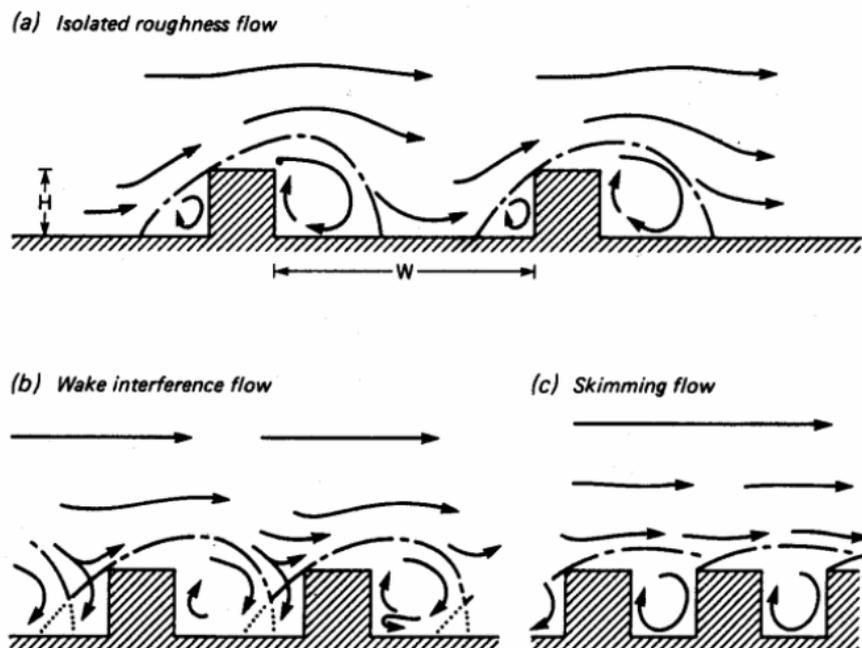


Figura 5.15: regimi fluidodinamici in ambiente urbano al variare del rapporto tra l'altezza H degli edifici e la distanza W rispetto alla direzione del vento (25)

Infine se H/W assume valori superiori a 0.7, si viene a creare una porzione di aria confinata tra due file di edifici quasi completamente disaccoppiata dall'aria sovrastante, in cui si instaurano uno o due vortici, a volte permanenti ed a volte intermittenti, che scambiano aria con l'atmosfera sovrastante mediante un debole effetto di *entrainment*. Questa è la classica situazione che si riscontra nelle maggiori città del mondo: l'eccessiva altezza e vicinanza degli edifici inducono una stagnazione dell'aria e limitano l'asportazione del calore per convezione.

Il rapporto H/W è tuttavia inadatto a descrivere efficacemente la grande varietà delle situazioni urbane.

Una misura più flessibile e più utilizzata per quantificare l'influenza della geometria sugli scambi radiativi è lo *sky view factor* (SVF o ψ_s), definito come il rapporto tra la radiazione ricevuta (o emessa) da una superficie planare e la radiazione emessa (o ricevuta) dall'intero ambiente emisferico e, quindi, risulterà un valore compreso tra zero e uno. Lo SVF è pertanto una caratteristica di uno specifico punto nello spazio ed esprime l'entità dello scambio radiativo con il cielo.

Se consideriamo un punto della superficie urbana, la radiazione proveniente dal punto in parte raggiunge il cielo e in parte viene assorbita dalle superfici circostanti (edifici, alberi,...). E' pertanto possibile calcolare lo SVF di un sito sottraendo da uno tutti i fattori di forma delle superfici "viste" dal punto (Figura 5.16).

I valori dello SVF si aggirano per le aree urbane tra 0.3 – 0.6, mentre per le aree suburbane tra 0.6 – 0.9.

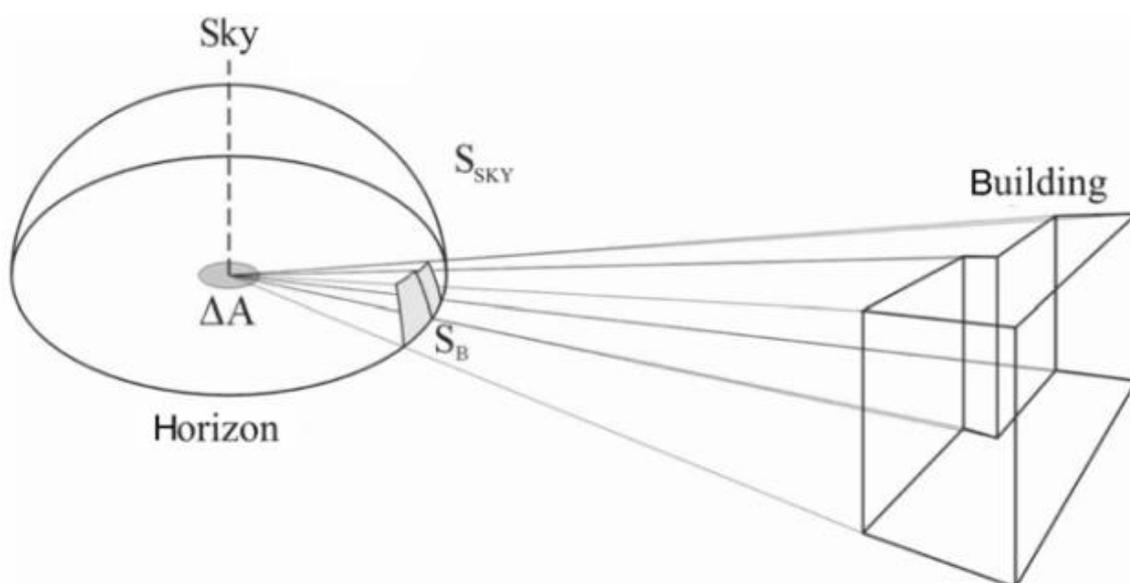


Figura 5.16: proiezione di un edificio (S_B) 'visto' da un elemento di superficie (ΔA) su un emisfero (33)

La riduzione dello SVF nei canyon urbani è considerata una delle principali causa delle UHI al di sotto dell'altezza media degli edifici, poiché comporta una diminuzione delle perdite radiative notturne in condizioni di vento debole e cielo sereno. Tale affermazione è supportata dalle osservazioni di Oke (34) che ha riscontrato una correlazione tra SVF e intensità massima notturna dell'UHI in varie città (Figura 5.17).

5.4 L'effetto mitigativo dei tetti verdi

Sono disponibili solo pochi studi aventi l'obiettivo di valutare il potenziale mitigativo nei confronti dell'isola di calore da parte dei tetti verdi su scala urbana. La maggior parte di essi sfruttano tecniche simulative basate su modelli della mesoscala e considerano tetti di tipo estensivo.

Sono stati presi in esame, e di seguito riassunti, alcuni studi relativi alle città di New York e Chicago negli USA, così come per Hong Kong e Tokyo in Asia, aventi questo scopo. Vengono riportate, inoltre, informazioni importanti anche su uno studio sperimentale a Singapore.

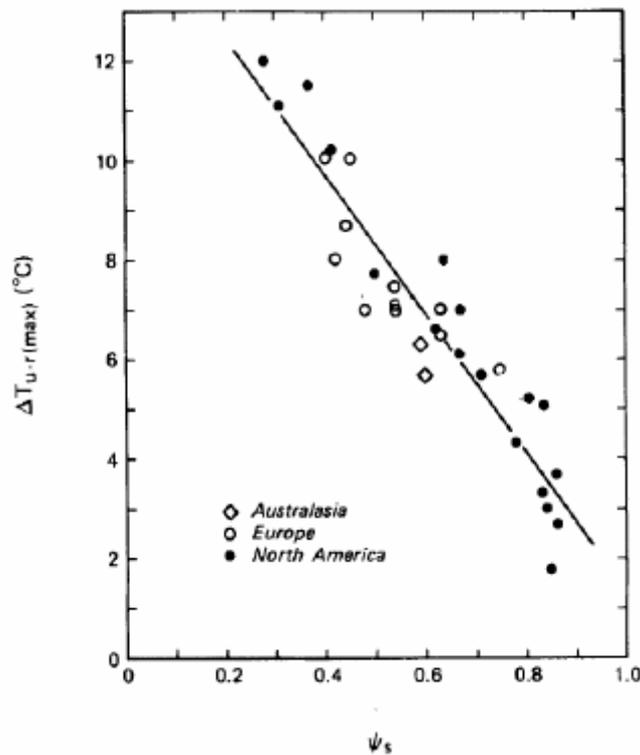


Figura 5.17: relazione tra UHI (intensità di isola di calore urbana) e SVF osservata durante notti estive e senza nubi (31)

Smith e Roeber (35) descrivono uno studio simulativo con lo scopo di valutare il potenziale mitigativo dei tetti verdi a Chicago.

Chicago è una città leader nella tecnologia dei *green roofs* con più di 50 000 m² di tetti verdi installati solo nel 2008.

Nello studio viene utilizzato il modello ARW (Advanced Research version of the Weather Research and Forecasting Model) affiancato ad un modello dello strato della copertura urbana.

Basandosi sui risultati forniti da altri, i tetti verdi sono stati modellati con un albedo equivalente di 0.8.

Così facendo è stato provato che l'impiego di coperture verdi comporta un importante effetto rinfrescante per le città in quanto le temperature urbane tra le 19:00 e le 23:00 erano di 2-3 K inferiori rispetto alle temperature simulate senza la loro presenza.

Un altro studio simulativo con lo scopo di valutare l'impatto di diverse tecniche per la mitigazione dell'UHI è stato condotto a New York, USA (36).

Il modello utilizzato in questo caso è stato quello climatico regionale, ovvero il Penn State/NCAR MM5, cioè un modello tridimensionale non idrostatico che simula dinamicamente le interazioni tra la tipologia di terreno e le variabili climatiche.

Anche in questa situazione sono stati presi in considerazione tetti verdi estensivi con erba.

A livello di risultati viene riportato che la temperatura ambiente di picco a due metri di altezza alle 12:00 del 14 Agosto 2001 è diminuita di 0.37-0.86 K, mentre la riduzione della temperatura diurna media era vicina a 0.3-0.55 K.

Ulteriori simulazioni sono state condotte a Tokyo per valutare il potenziale climatico di diverse tecniche di mitigazione, inclusi i tetti verdi (37).

Per fare ciò è stato utilizzato il modello CSCRC (*coupled simulations of convection, radiation, and conduction*) e sono stati analizzati dei tetti verdi di tipo estensivo seminati ad erba.

È stato calcolato che, quando le coperture verdi erano installate tra edifici di media o alta altezza, il loro potenziale nel diminuire la temperatura ambiente decresceva fino a livelli trascurabili a livello della strada.

Risultati simili sono stati riportati da Ng et al. (38), nel valutare l'impatto climatico di coperture vegetate installate tra edifici alti 60 m ad Hong Kong.

Lo studio in questo caso è stato condotto tramite il software ENVI-met, grazie al quale vengono simulati sia tetti verdi estensivi che intensivi.

È stato così riscontrato che il possibile abbassamento della temperatura ambiente a livello della strada è praticamente nullo in questo caso di area ad alta densità. Lo studio conclude affermando che, quando il rapporto H/W è maggiore di uno, i possibili benefici di raffrescamento sono bassi a livello pedonale.

Wong et al. (39) valutano il potenziale mitigativo dei tetti verdi tramite misurazioni della temperatura ambientale a diverse altezze al di sopra di un tetto vegetato e di uno convenzionale a Singapore.

All'interno dello studio viene riportato che l'effetto rinfrescante del tetto verde è limitato in funzione della distanza dal tetto. La massima differenza di temperatura dell'aria era di 4.2 K misurata a 30 cm dal tetto alle 18:00. Per distanze maggiori, ed in particolare ad un metro di altezza, l'effetto di raffrescamento viene osservato durante ore non di picco e in particolare dal pomeriggio all'alba del giorno successivo. Il *paper* conclude affermando che i tetti verdi possono essere efficaci quando l'altezza degli edifici è inferiore a 10 m.

Uno studio simile viene menzionato da Sun et al. (40), all'interno del quale vengono riportate delle misurazioni relative alla temperatura ambiente al di sopra di un tetto verde e ad un'altezza di 2.5 m a Taipei.

Viene evidenziato come i tetti verdi diminuiscano la temperatura dell'aria mediamente di 0.36°C, mentre la riduzione massima era vicina a 1.6 K. Contrariamente ai risultati di Wong et al., si registra una maggiore influenza da parte dei tetti verdi durante il giorno.

Le principali caratteristiche degli studi appena riportati sono riassunte in Tabella 5.5.

Grazie ad essi è evidente che, quando i tetti verdi sono installati tra edifici alti o anche di media altezza, il loro potenziale mitigativo è praticamente trascurabile. Inoltre si noti come i risultati riportati a Chicago e a New York presentano differenze importanti: il potenziale mitigativo calcolato a Chicago è circa 2-3 volte maggiore di quello registrato a NY. Una possibile giustificazione per questa discrepanza consiste nell'impiego di un albedo equivalente e nella valutazione indiretta condotta nel primo studio, che così facendo trascura i fenomeni latenti.

5.5 L'isola di calore relativa alla città di Bologna

Nel 2001 e 2006 sono state svolte campagne di misura estive per determinare la distribuzione e magnitudine dell'isola di calore e il disagio bioclimatico a Bologna (41).

I risultati della campagna del 2006 indicano che l'analisi delle condizioni bioclimatiche condotta rispetto alla temperatura apparente e all'indice di Thom (o discomfort index) è sovrapponibile ed assimilabile a quella della sola temperatura. All'interno dell'area

Riferimento	Città	Tipo di ricerca	Tipo di tetto verde	Risultati
Smith e Roeber (2011)	Chicago, USA	Simulazione con il Weather Research and Forecasting Model	Estensivo	Le temperature urbane tra le 19:00 e le 23:00 erano di 2-3 K più fresche rispetto alle temperature simulate senza la loro presenza.
Savio et al. (2006)	New York, USA	Simulazione con MM5	Estensivo	La temperatura ambiente di picco a 2 m di altezza alle 12:00 è diminuita di 0.37-0.86 K, mentre la riduzione della temperatura diurna media era vicina a 0.3-0.55 K.
Chen et al. (2009)	Tokyo, Japan	Simulazione col modello CSCRC	Estensivo	Impatto praticamente trascurabile a causa dell'altezza degli edifici su cui erano installati i <i>green roofs</i>
Ng et al. (2012)	Hong Kong	Simulazione col programma ENVI-met	Estensivo	Impatto praticamente trascurabile a causa dell'altezza degli edifici su cui erano installati i <i>green roofs</i> .

Tabella 5.5: caratteristiche degli studi esaminati in merito al potenziale mitigativo dei tetti verdi.

urbana le condizioni bioclimatiche sono abbastanza uniformi durante il giorno, mentre si differenziano sensibilmente durante la notte. Inoltre, nella notte sono marcatamente peggiori all'interno dell'area urbana rispetto all'area periurbana e rurale pianeggiante. In collina le condizioni sono più disagiati di quelle dell'area pianeggiante.

Nelle ore centrali della giornata le condizioni bioclimatiche più disagiati si riscontrano nelle aree rurali con temperature apparenti di circa 1 – 2°C maggiori, pari a 0.5 – 1 unità dell'indice di Thom, rispetto alla stazione di riferimento urbana. La temperatura della collina (Sasso Marconi) è di circa 1°C più mite rispetto a quella del riferimento urbano.

Le temperature massime diurne si raggiungono sia nelle centraline urbane che in quelle rurali verso le 16, i valori minimi verso le 6 del mattino. Le temperature massime sono molto prossime in tutte le stazioni con differenze contenute entro 1°C. I valori più elevati si riscontrano nelle centraline verso la pianura rurale nord. Le centraline collocate in pianura nelle aree rurali mostrano valori di temperatura minima in media di 3 – 4 °C inferiori rispetto alla centralina urbana di riferimento. Valori inferiori di circa 1 °C rispetto al riferimento urbano si riscontrano presso le stazioni in zona periurbana e collinare.

I valori massimi di umidità relativa si verificano mediamente verso le 8 del mattino, con marcate differenze: nell'area rurale pianeggiante l'umidità relativa massima risulta circa il 25% in più rispetto alla stazione di riferimento urbana; la differenza tipica tra la zona periurbana ed il riferimento urbano è 10%.

Umidità relative massime leggermente inferiori al riferimento urbano si riscontrano nella stazione collinare di Sasso Marconi. Mediamente, le umidità relative nelle stazioni rurali di pianura sono superiori per circa il 15%. I valori minimi si collocano verso le 17. Le differenze tra i vari siti rispetto ai valori minimi di umidità relativa sono state pressoché nulle.

Le analisi effettuate tramite un profilatore di vento hanno rivelato un regime di brezza urbana, combinato con una attenuazione dell'intensità dei venti negli strati più bassi dell'aria, più forte nell'area urbana che in quella rurale.

La campagna del 2001, con 9 stazioni di riferimento e una rete di 21 termometri, ha permesso di disegnare i confini dell'isola di calore urbano in una data estiva di riferimento e la sua evoluzione oraria diurna e notturna (Figura 5.18).

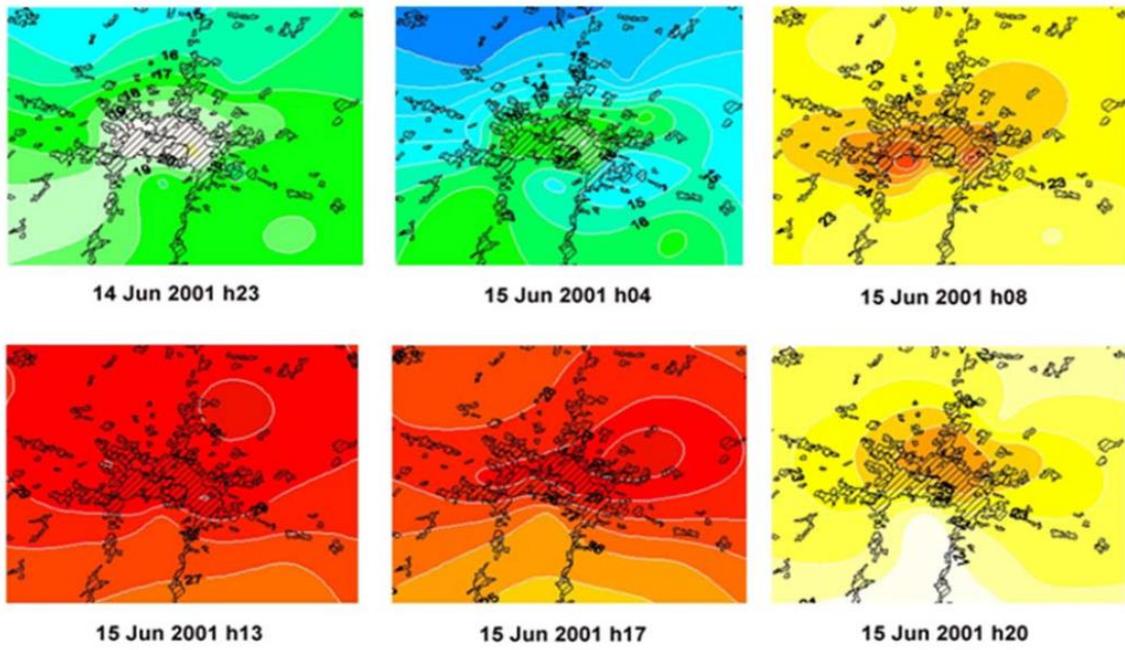


Figura 5.18: confini dell'isola di calore urbana bolognese registrati in data 15/06/01 (41)

6. Il caso di studio di Bologna

Nell'ultimo decennio l'Università di Bologna si è posta in prima linea in merito al tema della sostenibilità ambientale per quanto concerne gli ambiti di competenza dell'Alma Mater. Già nel 2009 con la stesura del piano MOSES (MObilità Sustainability Energy Solutions) si evidenzia tale interesse e con la pubblicazione del Piano della Sostenibilità Ambientale 2013-2016 viene riconfermata la volontà di *“fungere da elemento trainante nel processo di transizione verso una società sostenibile”* (42).

All'interno di questi piani, in seguito ad un'approfondita analisi dello stato di fatto, vengono proposti sia degli interventi di riqualificazione tecnologica e miglioramento delle classi energetiche che dei progetti per l'utilizzo di fonti rinnovabili.

In merito a quest'ultimo ambito si può citare l'installazione risalente al 2012 di un campo fotovoltaico per una potenza complessiva di 266,222 kWp su diverse coperture della sede del Lazzaretto della Facoltà di Ingegneria di Bologna da parte di Finanziaria Bologna Metropolitana spa con lo scopo di diminuire i fabbisogni elettrici dalla rete.

È proprio in questo clima di crescente interesse per l'ecologia e la sostenibilità ambientale che nasce il progetto di ricerca “Tetti Verdi dell'Università di Bologna” ed in particolare grazie ad un'iniziativa del Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica, Ambientale e dei Materiali (DICAM) e del Centro Interdipartimentale di Ricerca Industriale Edilizia e Costruzioni – U.O. Fluidodinamica (CIRI EC), in collaborazione con l'Ufficio Tecnico di Ateneo (AUTC), il Dipartimento di Scienze Agrarie (DipSA) e l'Azienda Agraria dell'Università di Bologna (AUB).

Scopo di tale progetto è la realizzazione di un prototipo che possa fornire informazioni e dati utili per le ricerche sulle performance e sui benefici ambientali dei vari pacchetti tecnologici installati.

6.1 Il sito di studio

Il plesso del Lazzaretto (Figura 6.1) è stato inaugurato il 5 maggio 2007; si tratta pertanto un'area relativamente nuova e moderna che ospita la Facoltà di Ingegneria ed all'interno della quale sono stati progettati edifici sia per lo svolgimento della didattica che della ricerca, in grado di ospitare circa 8 000 persone.

Il complesso della superficie è di oltre 20.000 m² ma con la fase di completamento dell'opera si sono raggiunti oltre 70.000 m².

L'edificio principale è posto nella parte in alto a sinistra del lotto; si tratta di un'opera moderna e funzionale che ospita le attività didattiche di diversi Corsi di Studio ed è quindi stata progettata per tutte le attività connesse allo studio. È pertanto dotata di aule, sale studio, laboratori, una biblioteca ed un servizio caffetteria.

Questo edificio ha una forma geometrica articolata, che risulta iscritta in un rettangolo di dimensioni 65x52 m².



Figura 6.1: cartografia dell'area di studio del Lazzaretto (Bologna) estratta da Google Maps

La costruzione si sviluppa in un piano interrato e due fuori terra ed è caratterizzata da una copertura praticabile gradonata.

Connesso all'edificio principale si trova quello dei dipartimenti.

Esso presenta una pianta rettangolare di lati $72 \times 65 \text{ m}^2$, è caratterizzato da un'ampia corte interna ed è articolato su un piano interrato e tre piani fuori terra.

Altri corpi di fabbrica minori arricchiscono il complesso universitario; tra questi il più rilevante è destinato ad ospitare le centrali tecnologiche, articolato su un ampio piano interrato ed un piano terra.

Nella zona sud del lotto invece sono stati progettati diversi capannoni atti ad ospitare i laboratori dei rispettivi dipartimenti.

Le strutture degli edifici principali e di quello delle centrali tecnologiche sono realizzate in c.a. e gettate in opera, i solai sono di tipo prefabbricato, completati con getti in opera. Le travi, per ragioni funzionali, sono prevalentemente a spessore, mentre i pilastri sono a sezione circolare. Setti e nuclei irrigidenti sono disposti in modo da migliorare il comportamento sismico dell'intera struttura.

Gli edifici individuati nella convenzione tra Università degli Studi di Bologna e SEIC Verde Pensile – Harpo spa su cui installare il pacchetto di tetto verde sono alcuni tra quelli rimasti inalterati dal citato progetto dell'Ateneo di installazione di impianti fotovoltaici ed in particolare si tratta di stabili a Sud del lotto caratterizzati da coperture non particolarmente ricche di impianti e con proprietà strutturali idonee all'installazione del pacchetto.

Nello specifico i corpi individuati a tale scopo sono stati (Figura 6.2):

- Corpo 5
- Corpo 8
- Corpo 11

I due tetti quadrati (corpo 8 e 11) hanno stesse dimensioni e nello specifico un'area pari a 110 m^2 ed un perimetro pari a 42 m, mentre il tetto rettangolare (corpo 5) presenta un'area di 233 m^2 ed un perimetro di 76.2 m. Complessivamente i tre corpi rivestono un'area pari a 453 m^2 ed un perimetro totale di 118.2 m.

Si prevede che l'installazione delle coperture verdi coprirà una superficie complessiva di 150 m².

Al momento sono stati realizzati solo i progetti relativi al corpo 5 ed al corpo 8.

6.1.1 Il corpo 5 ed il corpo 8

Per ampliare il laboratorio di Geoingegneria e Risorse Naturali LAGIRN in passato è stato addossato al corpo di fabbrica rettangolare (corpo 5) uno più piccolo a pianta quadrata (corpo 8).

Gli edifici sono stati realizzati tramite le medesime tecniche, ovvero con strutture prefabbricate in c.a., le cui coperture sono realizzate mediante tegole prefabbricati in c.a. con sezione a pi greco.

In seguito ad un'analisi strutturale dei tetti prescelti (per considerazioni più dettagliate si veda il capitolo successivo) e alla verifica dello stato esistente della guaina impermeabilizzante, nel marzo 2013 si è proposto un intervento di riqualificazione della guaina impermeabilizzante per tutta l'estensione dei tetti in esame, in quanto obsoleta, e nell'estate 2013 si è deciso di inverdire solo alcune porzioni (Figura 6.3).

Nello specifico si è deciso di suddividere il corpo 8 in due fasce della medesima area:



Figura 6.2: individuazione dei corpi oggetto di intervento.

una che funge da tetto di riferimento (RR, *reference roof*), lasciato con la nuova guaina direttamente esposta agli agenti atmosferici, e l'altra inverdita con un pacchetto a *Sedum* (GR, *green roof*).

Per quanto riguarda il corpo 5, invece, si è scelto di occupare una porzione di 72 m², suddivisa poi in 3 fasce ognuna di spessore differente di substrato (nello specifico 8, 10 e 12 cm) inverdita con una selezione di piante autoctone effettuata da parte del Dipartimento di Scienze Agrarie (NA, *native plants roof*).

Se inizialmente si accedeva alle coperture mediante un apposito lucernario circolare di circa 1 m di diametro posto sulla sommità del corpo 5, oggi è possibile raggiungere il sito di studio grazie all'installazione di una scala protetta da gabbia di sicurezza.

6.1.2 L'analisi dei carichi

Grazie alla collaborazione con il Dipartimento di Tecnica delle Costruzioni è stata effettuata l'analisi dei carichi per la realizzazione delle coperture a verde.

I pesi degli elementi strutturali sono stati presi dagli elaborati del progetto originale dell'edificio, mentre quelli riguardanti il pacchetto verde da installare sono stati ricevuti direttamente dal fornitore.

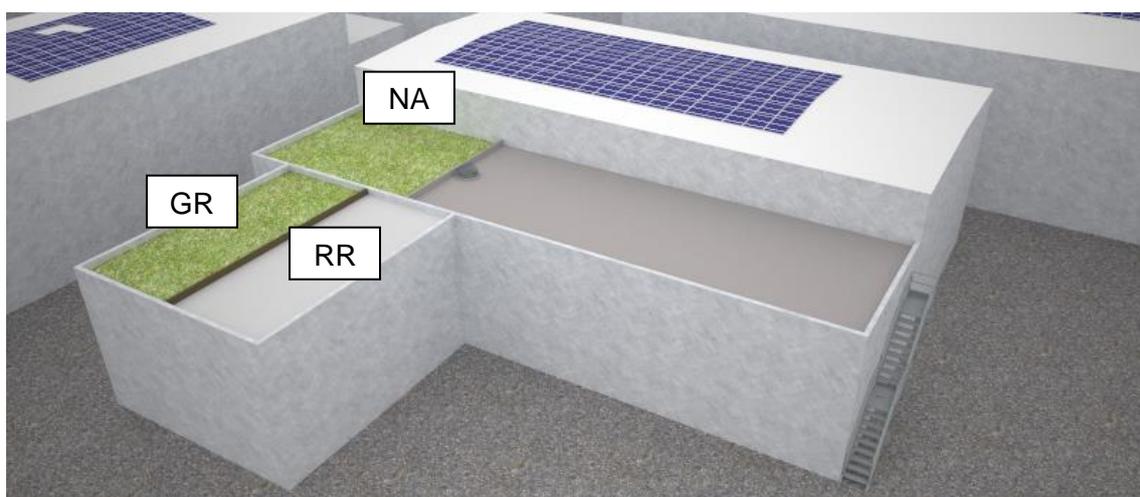


Figura 6.3: modello virtuale della copertura relativa ai corpi 5 ed 8 realizzato con Sketchup. Evidenziazione dei tre diversi tipi di tetto: *green roof* (GR), *reference roof* (RR) e *native plants roof* (NA).

I risultati relativi al Corpo 5 ed al Corpo 8 sono riportati nelle seguenti tabelle (Tabella 6.1, Tabella 6.2).

Calcolo del peso compressivo al piede della fondazione	
Contributo dei pilastri (kg)	50400
Contributo delle travi del piano primo (kg)	32800
Contributo delle travi di copertura (kg)	27800
Contributo dei tegoli del piano primo (kg)	86400
Contributo dei tegoli di copertura (kg)	70600
Contributo dei pannelli di tamponamento (kg)	169300
Peso totale al piede delle fondazioni (kg)	437300
Calcolo del peso compressivo al livello del piano di copertura	
Contributo delle travi di copertura (kg)	27800
Contributo dei tegoli di copertura (kg)	70600
Contributo dei pannelli di tamponamento di copertura (kg)	21300
Peso totale alla quota del piano di copertura (kg)	119700
Calcolo peso dell'intervento sulla copertura	
Peso al metro quadrato del tetto verde (kg/m ²)	150
Superficie tetto verde (m ²)	73.00
Peso totale del tetto verde (kg)	10950
Peso al metro lineare del parapetto (Kg/m)	12.05
Lunghezza complessiva dei parapetti (m)	31.60
Peso totale dei parapetti (kg)	381
Peso complessivo interventi (kg)	11331
Verifiche dell'incremento dei pesi dovuti agli interventi	
10% del peso al piede della fondazione (kg)	43730
10% del peso degli elementi alla quota del piano di copertura (kg)	11970
Percentuale, rispetto al peso alla quota del piano di copertura, dell'intervento (%)	9.47
Percentuale, rispetto al peso al piede della fondazione, dell'intervento (%)	2.74

Tabella 6.1: analisi dei carichi relativi al Corpo 5 (43)

L'incremento di peso dovuto agli interventi risulta inferiore al 10% sia dei pesi degli elementi posti alla quota del piano di copertura sia del peso totale al piede delle fondazioni, motivo per cui risulta verificata la non rilevanza ai fini sismici dell'intervento.

Calcolo del peso compressivo al piede della fondazione	
Contributo dei pilastri (kg)	18800
Contributo delle travi del piano primo (kg)	13000
Contributo delle travi di copertura (kg)	15800
Contributo dei tegoli del piano primo (kg)	34600
Contributo dei tegoli di copertura (kg)	36000
Contributo dei pannelli di tamponamento (kg)	64500
Peso totale al piede delle fondazioni (kg)	182700
Calcolo del peso compressivo al livello del piano di copertura	
Contributo delle travi di copertura (kg)	15800
Contributo dei tegoli di copertura (kg)	36000
Contributo dei pannelli di tamponamento di copertura (kg)	19000
Peso totale alla quota del piano di copertura (kg)	70800
Calcolo peso dell'intervento sulla copertura	
Peso al metro quadrato del tetto verde (kg/m ²)	125
Superficie tetto verde (m ²)	53.00
Peso totale del tetto verde (kg)	6625
Peso al metro lineare del parapetto (kg/m)	12.05
Lunghezza complessiva dei parapetti (m)	32.50
Peso totale dei parapetti (kg)	392
Peso complessivo interventi (kg)	7017
Verifiche dell'incremento dei pesi dovuti agli interventi	
10% del peso al piede della fondazione (kg)	18270
10% del peso degli elementi alla quota del piano di copertura (kg)	7080
Percentuale, rispetto al peso alla quota del piano di copertura, dell'intervento (%)	9.91
Percentuale, rispetto al peso al piede della fondazione, dell'intervento (%)	3.84

Tabella 6.2: analisi dei carichi relativi al Corpo 8 (43)

6.1.3 I pacchetti

Dopo aver effettuato la messa in sicurezza della copertura, nella prima settimana di Luglio 2013 si è proceduto stesura della nuova guaina impermeabilizzante *Derbigum* sui tetti dei corpi 5 ed 8 ed alla posa dei diversi pacchetti.

Il tetto verde del corpo 8 si estende per un'area di circa 50 m² e per esso si è scelto il pacchetto *Verde pensile estensivo – Sistema Seic Mediterranean green roofs* (Figura 6.4) tra tutti quelli offerti dalla SEIC Verde Pensile – Harpo spa, in quanto meglio si prestava alle ristrettezze relative ai carichi aggiuntivi ammissibili.

Procedendo dal basso verso l'alto, il pacchetto comprende:

- L'impermeabilizzazione antiradice *HarpoPlan ZD UV*
Si tratta di manti sintetici in PVC, rinforzati con una griglia in fibra di vetro, resistenti ai microrganismi e resistenti alle radici secondo norma EN 13948. La membrana è inoltre resistente ai raggi UV.
- Il feltro di accumulo idrico *MediPro MP 300*.
Esso ha la funzione di accumulare acqua e sostanze nutritive e di fungere da protezione meccanica per il foglio antiradice o l'impermeabilizzazione resistente alle radici. Inoltre, ha capacità di assorbimento idrico dopo drenaggio sul piano orizzontale per 30 minuti pari a 1,9 l/m².



Figura 6.4: pacchetto *Verde pensile estensivo – Sistema Seic Mediterranean green roofs* (44)

- L'elemento di drenaggio, accumulo e aerazione *MediTherm MT 25*.

Si tratta di un materiale sintetico provvisto di incavi per l'accumulo idrico, fori per l'aerazione e la diffusione di vapore e di una rete di canali di drenaggio sulla faccia inferiore. Lo spessore totale del pannello è pari a 25 mm.

- Il telo filtrante *MediFilter MF 1*.

Esso ha la funzione di mantenere contemporaneamente libera la circolazione di acqua e aria e per questa ragione va steso sopra gli elementi drenanti.

Realizzato in geotessile non tessuto, il fornitore ne indica le caratteristiche in merito a:

- La resistenza al punzonamento statico (UNI EN ISO 12236) pari a 1250 N;
- La penetrazione dinamica del cono (EN 918) pari a 29 mm;
- La resistenza alla trazione (UNI EN ISO 10319) pari a 9 kN/m;
- La resistenza a trazione al 5% di deformazione non inferiore a 4 kN/m (UNI EN ISO 10319);
- L'apertura caratteristica dei pori O90 compresa tra 0,10mm-0,20mm (UNI EN ISO 12956);
- L'indice velocità VIH50 $\geq 50 \cdot 10^{-3}$ m/s (EN ISO 11058).

Il telo filtrante è stato posato in opera libero con una sovrapposizione di almeno 20 cm e risvoltato ai contenimenti laterali.

- Il *substrato SEIC* per inverdimenti pensili estensivi dello spessore di 10 cm.

Esso viene realizzato dall'azienda produttrice, la Harpo, a rispetto della norma UNI 11235.

I substrati SEIC sono ottenuti dalla miscelazione in opportune percentuali di una parte minerale e di una parte organica in funzione delle esigenze (Tabella 6.3).

Gli elementi che compongono la parte minerale sono costituiti da materiali vulcanici quali lapillo vulcanico, pomice, laterizi frantumati e zeolititi; la parte organica, invece, presenta elementi quali torba e residui vegetali compostati.

La porzione organica presente nel substrato è ridotta al minimo necessario, poiché comporterebbe un calo di spessore nel tempo, una variazione strutturale del substrato e lo renderebbe facilmente aggredibile dalle specie infestanti.

Di particolare interesse è l'impiego del laterizio frantumato: si tratta di materiale granulare prodotto con laterizi selezionati, frantumati e vagliati provenienti da puro scarto di produzione. Esso presenta innegabili vantaggi per la salvaguardia

Parte minerale



Lapillo no crush:

- Elevata resistenza meccanica
- Granuli fortemente vascolarizzati che favoriscono il processo osmotico
- Presenza di aria
- Struttura stabile
- Resistenza ai cicli termici gelo/disgelo
- Ph neutro
- Leggerezza

Pomice:

- Elevata ritenzione idrica
- Leggerezza
- Controllo ph
- Resistenza al fuoco
- Inerzia termica
- Compensazione granulometrica

Zeolititi:

- Elevata ritenzione idrica
- Effetto strutturale

Parte organica



Torba baltica:

- Elevata ritenzione idrica
- Effetto strutturale
- Riduce la formazione di muschi



Compost vegetale:

- Nutrimento piante
- Limita la formazione di muschi

Tabella 6.3: caratteristiche dei substrati SEIC verde pensile (45)

salvaguardia dell'ambiente in quanto contribuisce a non spingere univocamente l'approvvigionamento di materiale in cave e offrendo, invece, interessanti possibilità per il riutilizzo di un materiale pregiato.

Si tratta quindi di un substrato dalle elevate prestazioni tecniche, tra cui è possibile citare il peso ridotto a massima saturazione, l'elevata permeabilità nel tempo, il contenuto in aria, la capacità di scambio cationico e la struttura chimica e fisica stabile.

- La vegetazione, composta da talee di diverse specie di *Sedum* (Figura 6.5).

Il tetto verde del corpo 5, invece, si differenzia da quello appena descritto per la profondità del substrato e per la vegetazione impiegata.

Tramite la collaborazione con il Dipartimento di Scienze Agrarie (DipSA) si sono scelte tre specie di piante autoctone tra quelle dei mesobrometi, delle quali sono stati raccolti i semi in natura. Nello specifico si è optato per esemplari di bromo (*Bromus erectus* Huds - Gramineae), di *Lotus corniculatus* L. e di *Dorycnium pentaphyllum* Scop., (entrambe Leguminosae) (Figura 6.7).

Il bromo è una graminacea molto diffusa nella fascia collinare-submontana della regione. Si trova in diversi tipi di vegetazione, solitamente in condizioni di luminosità e di scarsità d'acqua. Si riscontra infatti nei cespuglieti e nei boschi steppici ed anche nelle garighe ad elicriso. Diventa dominante e si addensa soprattutto quando interviene il pascolamento (46).

Il *Lotus corniculatus* L. appartiene alla famiglia dei mesobrometi, ovvero di particolari brometi meno xerofili che crescono su suoli abbastanza profondi e si presentano come praterie folte con densa cotica erbosa (46).

Infine, il *Dorycnium pentaphyllum* Scop è una pianta perenne alta 10-80 cm, con fusto legnoso non solo alla base a corteccia scura, caratterizzata da rami eretti, ascendenti, erbacei, sericei e grigio-verdastri.

Dai semi sono state ottenute giovani piantine, allevate in vivaio presso l'Azienda Agraria dell'Università di Bologna (AUB) e impiantate successivamente (12 luglio 2013) sul tetto, secondo tre diverse profondità di substrato (8 cm, 10 cm, 12 cm) (Figura 6.6).

Data la particolare e non del tutto idonea epoca d'impianto sul tetto, si è provveduto ad un'irrigazione giornaliera durante l'intero periodo estivo, per rendere possibile l'attecchimento. Successivamente, l'irrigazione è stata rallentata e poi sospesa, in modo da portare progressivamente l'impianto verso condizioni simili a quelle naturali.



Figura 6.5: fotografia del mix di *Sedum* scattata in autunno. Si possono notare le specie di *Sedum Acre*, *Sedum Reflexum*, *Sedum Floriferum*, *Sedum Sexangulare*, *Sedum Album rupestre* e *Sedum hispanicum*.

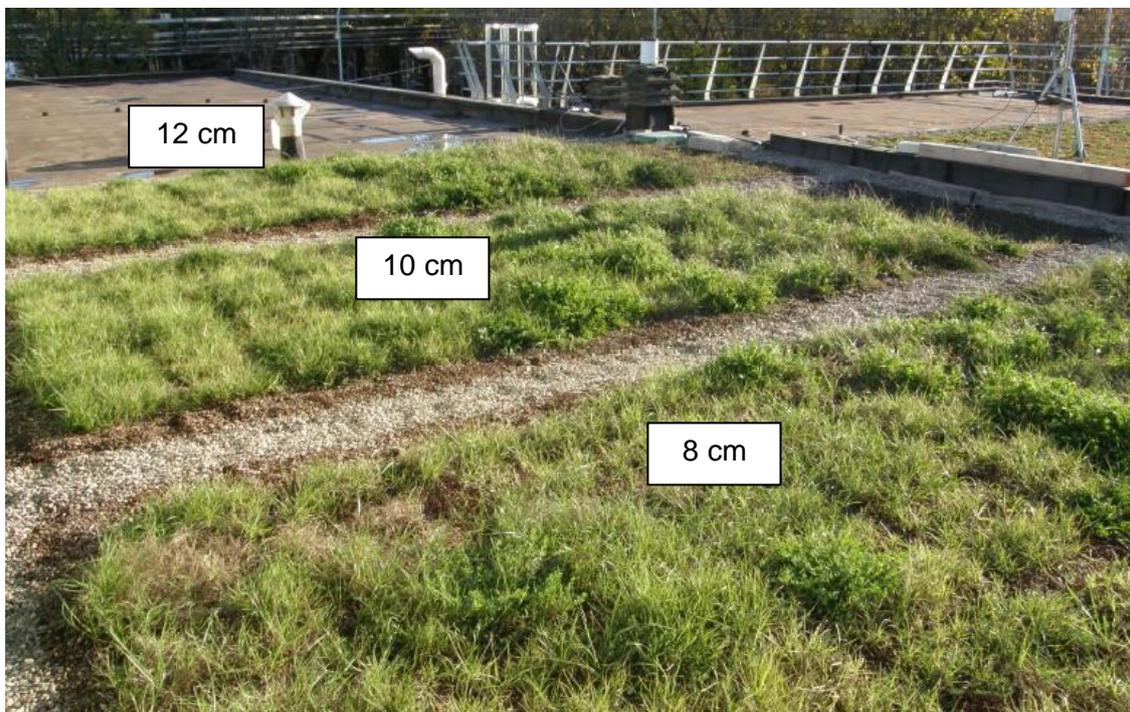


Figura 6.6: porzioni del corpo 5 caratterizzate da diverse profondità di substrato, inverdite con piante autoctone.

A poco più di tre mesi dall'impianto, la copertura vegetale realizzata con specie autoctone mostra buone condizioni di sviluppo su tutte e tre le profondità di substrato; pur nell'ambito di un risultato complessivamente buono, risultati migliori si hanno per la profondità di 12 cm.

Tramite il confronto tra la Figura 6.8 e la Figura 6.9 si può notare come, a distanza di più di un anno dall'installazione delle due coperture verdi, le talee di *Sedum* abbiano attecchito con successo ed abbiano superato l'estate senza problemi, estendendosi fino a formare un tappeto compatto dalle svariate sfumature.

Le porzioni del corpo 5 inverdite con specie autoctone si presentano invece parzialmente disomogenee in quanto, nonostante il manto appaia di un vivido color



Lotus corniculatus L.



Dorycnium pentaphyllum Scop.



Bromus erectus Huds.

Figura 6.7: specie presenti sul tetto verde coltivato con specie autoctone di Via Terracini.

verde, in alcuni punti purtroppo la vegetazione si è diradata e lascia intravedere lo strato di ghiaia alla base. Per queste ragioni durante il mese di Dicembre 2014 è stato previsto un intervento di risanamento del manto.

A differenza del mix di *Sedum*, però, le varietà di mesobrometi attirano piccoli insetti, come coccinelle e farfalle, grazie alla presenza di alcuni fiori contribuendo anche ad arricchire la biodiversità.

6.2 La strumentazione

6.2.1 La stazione Hobo

Sulla copertura del laboratorio di Geoingegneria e Risorse Naturali è stato installato un data logger della Hobo, ed in particolare il modello U30-WIF-VIA-10-S100-003 (Figura 6.10).

Esso è stato disposto nel punto baricentrico tra la porzione di tetto coltivata a *Sedum* e quella con le piante autoctone, in modo da poter ottenere dei parametri che si possano ritenere universali per l'intera copertura.

Alimentato da un piccolo pannello fotovoltaico e disposto su un treppiede alto 1 m circa, si tratta di uno strumento in grado di registrare dati relativi alle condizioni ambientali, quali:



Figura 6.8 : foto dei corpi 5 ed 8 scattata il 22/07/2013



Figura 6.9: foto scattata il 14/09/2014

- Le precipitazioni, grazie alla presenza di un pluviometro a bascula;
- L'intensità e la direzione del vento, tramite rispettivamente ad un anemometro a coppette e ad un anemoscopio;
- La temperatura dell'aria e la sua umidità relativa, grazie ad una sonda disposta ad 1.50 m da terra;
- La radiazione solare, tramite due sensori;
- La pressione barometrica;
- L'umidità del suolo (soil moisture), tramite un'apposita sonda inserita direttamente nel terreno.

Per le caratteristiche tecniche dei sensori si rimanda alla Tabella 6.4.

Per l'utilizzo della stazione è necessario il software HOBOWARE Pro con il quale si possono impostare tutti i parametri della registrazione, verificare lo stato di funzionamento del logger e il livello di carica della batteria via remoto.

Nello specifico i dati vengono registrati ogni cinque minuti, nonostante la stazione sia dotata di intervalli di registrazione personalizzabili da un secondo a nove ore.

Per questo studio si dispone di tutti i dati relativi all'anno 2014. Questi sono stati acquisiti con continuità durante tutti i mesi dell'anno, ma, a causa delle alte temperature registrate sul tetto in occasione dell'ondata di caldo tra il 7 e l'11 Giugno, non si possiedono i parametri relativi a quel periodo, così come per ragioni tecniche mancano anche quelli tra il 17 ed il 19 Maggio.

Pluviometro

Risoluzione	0.2 mm
Range di misura	10 cm/h, massimo 4000 svuotamenti per intervallo
Accuratezza di calibrazione	±1.0% fino a 20 mm/h
Dimensioni	22.8 (h) x 15.4 (ø) cm. Collettore 154 mm
Peso	1 kg

Direzione e Velocità del vento

Range di misura	0...45 m/s – 0...358°
Accuratezza	±1.1 m/s o ±4% lettura - ±5%
Risoluzione	0.38 m/s – 1.4°
Soglia di rilevamento	<0.5 m/s

Durata media sensore	5 anni tipica
Dimensioni	190x51 cm
Peso	300 g
Misurazioni	Velocità media del vento e picco massimo nell'intervallo
Temperatura	
Campo di misura	-40°C...+75°C
Accuratezza	±0.7°C a +25°C
Risoluzione	0.4°C a 25°C
Tempo di risposta	8 minuti con velocità dell'aria 2 m/s
Umidità Relativa	
Campo di misura	0%...100% RH tra 0°C...50°C
Accuratezza	±3% range 0°... 50°C, ±4% con condensa range 0°... 30°C
Risoluzione	0.5% a 25°C
Tempo di risposta	5 minuti a 90% con velocità dell'aria 2 m/s
Radiazione Solare	
Range di misura	0...1280 W/m ²
Range spettrale	300...1100 nm
Accuratezza	±10 W/m ²
Risoluzione	1.25 W/m ²
Dimensioni	4.1 cm altezza x 3.2 diametro
Peso	120 g
Pressione Barometrica	
Range di misura	660...1070 mb
Accuratezza	±1,5 mb
Risoluzione	0,1 mb
Dimensioni	4,5x4,8x1,6 cm
Peso	30 g
Lunghezza connettore	10 cm
Soil Moisture	
Range di misura	0...405 m ³ /m ³ contenuto volumetrico (0...40,5%)
Accuratezza	±0,031 m ³ /m ³
Risoluzione	0.0004 m ³ /m ³
Durata media sensore	3-5 anni tipica
Dimensioni	25.4x3.2x0.15 cm

Peso

112 g

Tabella 6.4: caratteristiche tecniche dei sensori della stazione Hobo (47)

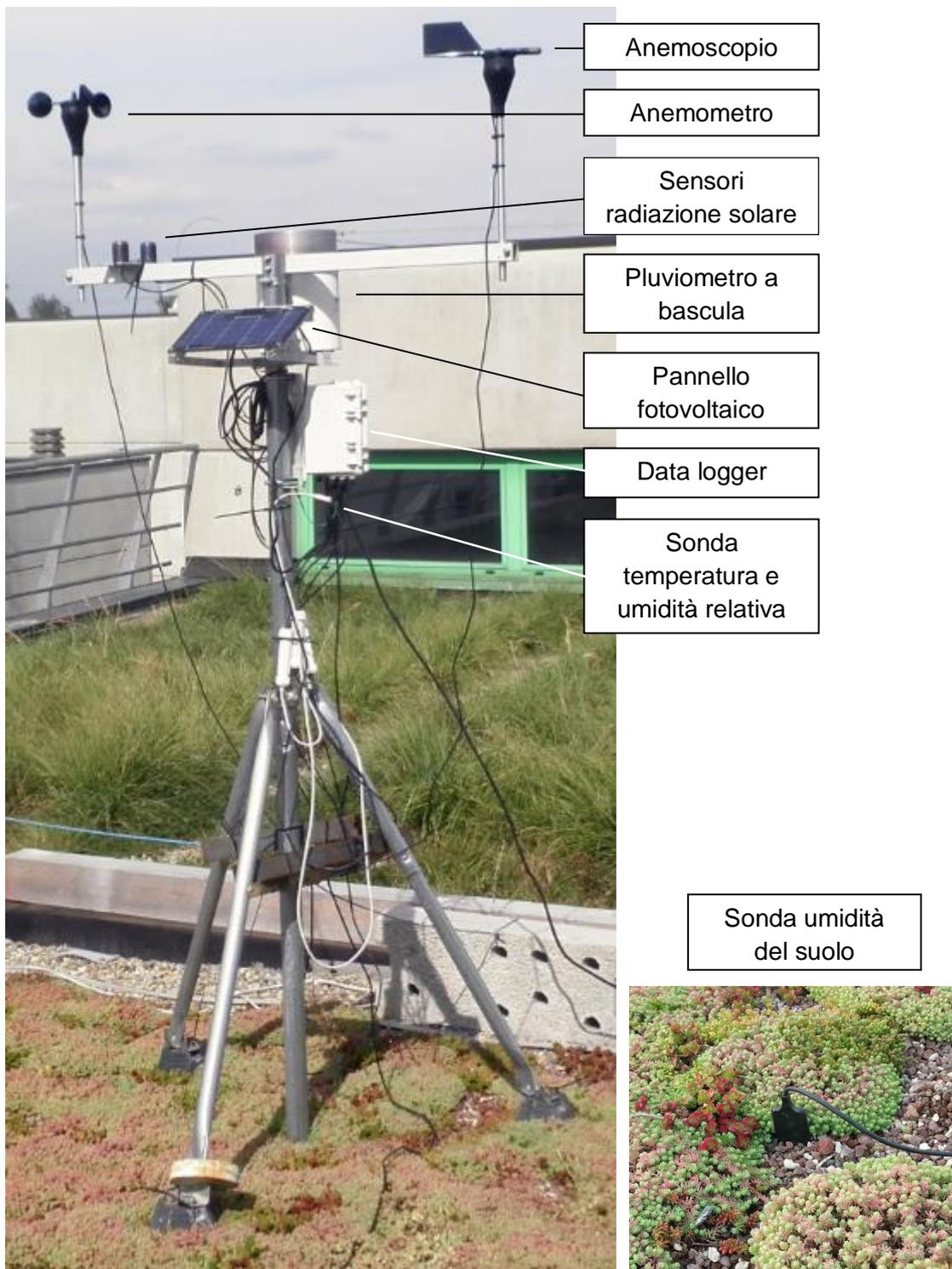


Figura 6.10: fotografia della stazione metereologica Hobo con identificazione dei sensori.

6.2.2 Le sonde

In aggiunta alla stazione appena descritta, in corrispondenza del Reference Roof è stato collocato un mini-registratore serie FT-90/USB-HT2 prodotto da Econorma.

Si tratta di un dispositivo bicanale in grado di annotare la temperatura e l'umidità relativa, alimentato da una batteria al litio 3,6 V di lunga durata, facilmente sostituibile. La sua durata varia in funzione dell'intervallo di memorizzazione e dall'abilitazione o meno dei LED di allarme di fuori soglia.

Il data-logger è composto da un contenitore IP-68 in tecnopolimero (65 x 30 mm) che ospita al suo interno un sensore di temperatura, mentre un secondo esterno è dotato di un cavetto alimentare da 100 cm (Figura 6.11).

Se il contenitore è posto in corrispondenza del RR, la sonda esterna è stata invece dedicata alla parte inverdita a *Sedum*. Fino al termine di Giugno quest'ultima era disposta superficialmente, poi dal mese successivo è stata spostata a -10 cm, ovvero all'interno del substrato.

La temperatura di funzionamento varia da -40 °C a +120 °C e lo strumento è caratterizzato da una risoluzione di 0.1°C e da un'accuratezza di +/- 0.5°C.

L'intervallo minimo di registrazione delle misure è pari ad un secondo, ma per le esigenze di questo studio lo si è impostato ad un minuto.

A differenza della stazione Hobo, in questo caso per l'acquisizione dei dati è necessario recarsi *in situ* e connettere un dispositivo portatile attraverso cavo USB (Figura 6.12).



Figura 6.11: mini-registratore serie FT-90/USB-HT2 (48)



Figura 6.12: interno del data-logger (48)

6.2.3 La termocamera

In data 27/09/14 sulla copertura del LAGIRN sono state scattate delle immagini ad infrarossi con l'ausilio di una termocamera portatile modello Fluke TiR400.

Il kit relativo alla termocamera (Figura 6.13) comprende:

- Thermal Imager
- AA con Alimentazione Mains Adapters, base di carica della batteria con due alloggiamenti
- 2 batterie intelligenti agli ioni di litio
- Custodia per il trasporto rigida
- Cavo USB
- Cavo HDMI
- Scheda di memoria rimuovibile
- Borsa morbida per il trasporto
- Cinghia regolabile per la mano (per destrorsi e sinistrorsi)
- Manuali dell'utente in formato cartaceo
- Manuali dell'utente su CD
- SmartView® Software Scheda di registrazione della garanzia.

Per i dati tecnici si rimanda alla Tabella 6.5.



Figura 6.13: il kit relativo alla termocamera Fluke TiR400 (49)

Le immagini termiche vengono visualizzate su un display LCD touch screen (640x480) ad alta visibilità, di qualità industriale; queste possono essere salvate in una scheda di memoria rimovibile.

Le immagini e i dati salvati possono essere trasferiti su un PC tramite la scheda di memoria, una connessione USB diretta al PC, in modalità wireless o tramite un dispositivo mobile.

La termocamera è alimentata da una robusta batteria intelligente agli ioni di litio ricaricabile. L'adattatore di alimentazione CA incluso consente di accedere direttamente all'alimentazione CA.

Lo strumento dispone di un sistema di messa a fuoco automatica Fluke LaserSharp™, nonché delle funzioni avanzate di messa a fuoco manuale. Inoltre, offre molte funzioni e caratteristiche utili associate con la tecnologia IR-Fusion®, la modalità Autoblend™, il

Temperatura	
In funzione	Da -10 °C a 50 °C
Immagazzinaggio	Da -20 °C a 50 °C senza batteria
Portata di temperatura (non tarato sotto i -10 °C)	da -20 °C a +1200 °C
Precisione	±2 °C o 2% (a seconda del valore più alto) a 25 °C ambiente
Umidità relativa	
Dal 10 % al 95 % senza condensa	
Ciclo di taratura	
2 anni (in condizioni di normale funzionamento e invecchiamento)	
Fotocamera visiva (a luce visibile)	
Tipo	Prestazioni industriali 5,0 megapixel
Allineamento minimo parallasse con obiettivo IR standard	~60 cm
Obiettivo a infrarossi standard	
Campo visivo	24 °x 17°
Risoluzione spaziale (IFOV)	1,31 mRad
Distanza focale minima	15 cm
Dimensioni (A x L x P)	
27.7 cm x 12.2 cm x 16.7 cm	
Peso (con batteria)	
1.04 kg	

Tabella 6.5: caratteristiche tecniche relative alla termocamera Fluke TiR400 (49)

sistema di annotazione delle foto IR-Photo Notes™, la connettività WiFi™, la connettività Bluetooth® e la connettività video HDMI® .

In dotazione alla termocamera viene anche fornito il software SmartView®. Questo programma professionale ad alte prestazioni permette di analizzare le immagini salvate e generare report. SmartView è inoltre utilizzato per esportare immagini a infrarossi e a luce visibile in formato .jpeg, .jpg, .jpe, .jfif, .bmp, .gif, .dip, .png, .tif o .tiff.

6.2.4 Le termocoppie

A partire dal mese di Ottobre 2014, a supplemento della strumentazione descritta in precedenza, si sono disposte sulla copertura otto termocoppie per poter tracciare dei profili di temperatura verticali e fare confronti tra le diverse aree del tetto.

Fornite dalla P.C.B. Technologies, le termocoppie misurano lunghezze diverse (per la precisione 2, 3 o 10 m) per poter raggiungere comodamente anche l'area del Native.

Nello specifico esse sono state giustapposte a dei sostegni, orientate tutte nella medesima direzione e distanziate in verticale a determinati intervalli a seconda delle settimane (Figura 6.14).

Le termocoppie sono in politetrafluoroetilene (PTFE), una materia plastica utilizzata per superfici sottoposte alle alte temperature, e di tipo K (Chromel (Ni-Cr) (+)/Alumel (Ni-Al) (-)).

Esse sono state acquisite dopo che la ditta fornitrice ne ha effettuato la calibrazione.

Tramite la Pico Technology è stato acquistato invece il data logger TC-08 provvisto di otto canali, le cui specifiche sono indicate in Tabella 6.6.

Per le termocoppie di tipo K il data logger è in grado di misurare temperature da -270 a 1370°C.

Assieme allo strumento, la ditta fornisce anche il software per l'acquisizione dei dati che prende il nome di Picolog. Si tratta di un programma potente ma flessibile, progettato per la raccolta, l'analisi e la visualizzazione di dati per lunghi o brevi periodi di tempo.

È possibile visualizzare i dati sia durante che dopo la raccolta, in formato grafico o su un foglio di calcolo. Se necessario, è anche possibile esportare agevolmente i dati in altre applicazioni come è avvenuto per lo studio in questione.

Come per la stazione Hobo, anche per le termocoppie l'intervallo di acquisizione dei dati è pari a cinque minuti.

Numero di canali	8
Accuratezza di temperatura	Somma di $\pm 0,2\%$ e $\pm 0,5\%$ C
Accuratezza di tensione	Somma di $\pm 0,2\%$ e $\pm 10 \mu\text{V}$
Protezione dal sovraccarico	$\pm 30 \text{ V}$
Ingresso tensione	$\pm 70 \text{ mV}$
Velocità di lettura	Fino a 10 letture al secondo
Connettori d'ingresso	Termocoppia in miniatura
Connessione	PC USB
Dimensioni	201 x 104 x 34 mm

Tabella 6.6: caratteristiche del data-logger TC-08 (50)



Figura 6.14: fotografia relativa alle termocoppie applicate al RR e al GR nella seconda settimana di Ottobre.

6.2.5 I misuratori di livello

In corrispondenza di due angoli della copertura del Corpo 8, esattamente quelli posti presso la facciata rivolta a sud-ovest, sono stati posizionati due misuratori di livello (Figura 6.15). Sono stati ivi posizionati in quanto il deflusso proveniente dalla copertura s'immette in questi punti nei canali di gronda. Misurano l'uno i livelli dei deflussi provenienti dalla metà impermeabile del Corpo 8, l'altro quelli provenienti dalla zona verde del Green Roof.

Anche in corrispondenza del Native è stato predisposto un misuratore di livello cui fa riferimento l'intera area da 72 m² (Figura 6.16). Anche per esso sono state adottate le logiche appena descritte, pertanto è stato disposto nel punto in cui era presente il canale di scolo.

Lo strumento è nello specifico composto da diverse parti (Figura 6.17):

- Un misuratore di livello, dotato di sonda ad ultrasuoni. La sonda è collegata mediante un lungo cavo al misuratore, il che ha permesso di collocare lo strumento lontano dal luogo di effettiva misurazione. Esso infatti è posizionato su di un pallet nella zona impermeabile del Corpo 8.
- Un canale in plexiglass artificiale rettangolare che termina con uno stramazzo triangolare all'ingresso del canale di gronda. Esso è opportunamente siliconato sullo spigolo della copertura, in modo che l'acqua che raggiunge il canale di gronda sia solamente quella che lo attraversa.



Figura 6.15: fotografia relativa ai misuratori di livello del Reference e del Green Roof e alle aree di loro pertinenza

- Una batteria del misuratore di livello. Si tratta di una classica batteria per automobili. Anch'essa è posta sul pallet sul quale giacciono gli strumenti misuratori di livello.

I misuratori di livello e la batteria che li alimenta sono coperti da un contenitore di plastica che li protegge dalla pioggia.



Figura 6.16: fotografia relativa al misuratore di livello del Native Roof e all'area di sua pertinenza



Figura 6.17: dettaglio della strumentazione presente in corrispondenza del Reference

6.3 Analisi dati

Si procede ora all'analisi dei dati raccolti durante il corso dell'anno. Verranno *in primis* descritti i parametri ambientali che caratterizzano il sito oggetto di studio ed in seguito verranno effettuate le analisi termiche ed idrauliche più propriamente connesse alle tre tipologie di pacchetto presenti sul tetto (GR, NA e RR).

6.3.1 I parametri ambientali

6.3.1.1 Il vento

Per effettuare l'analisi del vento si sono calcolati per ogni mese sia le occorrenze relative alla direzione del vento che la velocità media in funzione della direzione dello stesso.

In primis, però, è stato necessario eliminare i dati con velocità del vento pari a zero, in quanto rappresentano un momento di calma a cui corrisponde una costanza della direzione indicata dallo strumento.

In seguito i dati sono stati raggruppati all'interno di classi da 10°; in questo modo, se la direzione del vento soffia nell'intervallo $[0°;10°)$, il dato risulterà inserito nella prima classe e così via (Figura 6.18).

Siccome a seconda del mese in questione si dispone di una quantità di dati differenti (per una questione di numero di giorni, ma anche per la mancanza di alcuni dati per ragioni tecniche), questi si sono normalizzati per facilitarne il confronto (Figura 6.19).

Si ricorda che con il termine occorrenza si indica la ricorrenza, in questo caso mensile, di un dato all'interno dello specifico intervallo, mentre che per normalizzazione di un insieme di dati si intende il rapporto tra ogni dato e la somma di tutte le occorrenze di tale insieme. Si indicherà tale rapporto anche con il nome di frequenza; questo implica che la somma delle frequenze all'interno dello stesso mese sarà pari ad uno.

Dall'analisi dei dati si evince che durante il corso dell'anno si evidenziano tre direzioni prevalenti per lo soffiare del vento e queste nello specifico sono NNE (Grecale), SO (Libeccio) e NNO (Tramontana).

Si pensa non si registrino venti tra i 230 ed i 340° in quanto per tali angolazioni la stazione risulta protetta dall'edificio adiacente più alto. Analogamente non si registrano venti da pieno Nord poiché un corpo di fabbrica del laboratorio di Geoingegneria e

Risorse Naturali LAGIRN protegge la stazione essendo più alto rispetto al tetto verde di un paio di metri.

Durante i primi mesi dell'anno, da Gennaio fino a Marzo, il vento prevalente soffia in direzione NNE, poi verso Aprile tale andamento si modifica a favore dell'angolazione NNO. Quest'ultima rimane la direzione predominante fino a Settembre, durante il quale il vento vira verso SO. Infine, durante il mese di Novembre le correnti d'aria prevalenti tornano a soffiare in direzione NNE, fino a raggiungere la loro massima espressione in Dicembre.

I venti prevalenti, però, non sono sempre quelli più intensi (Figura 6.20). A titolo esemplificativo si indica il mese di Febbraio per il quale si raggiungono raffiche pari a 1.7 m/s in direzione NNO e pari a 1.8 m/s in direzione SO quando il vento prevalente è invece il Grecale.

Il mese durante il quale si sono registrate le raffiche di vento maggiori è quello di Marzo per cui si è raggiunto un valore pari a 2.3 m/s in direzione N.

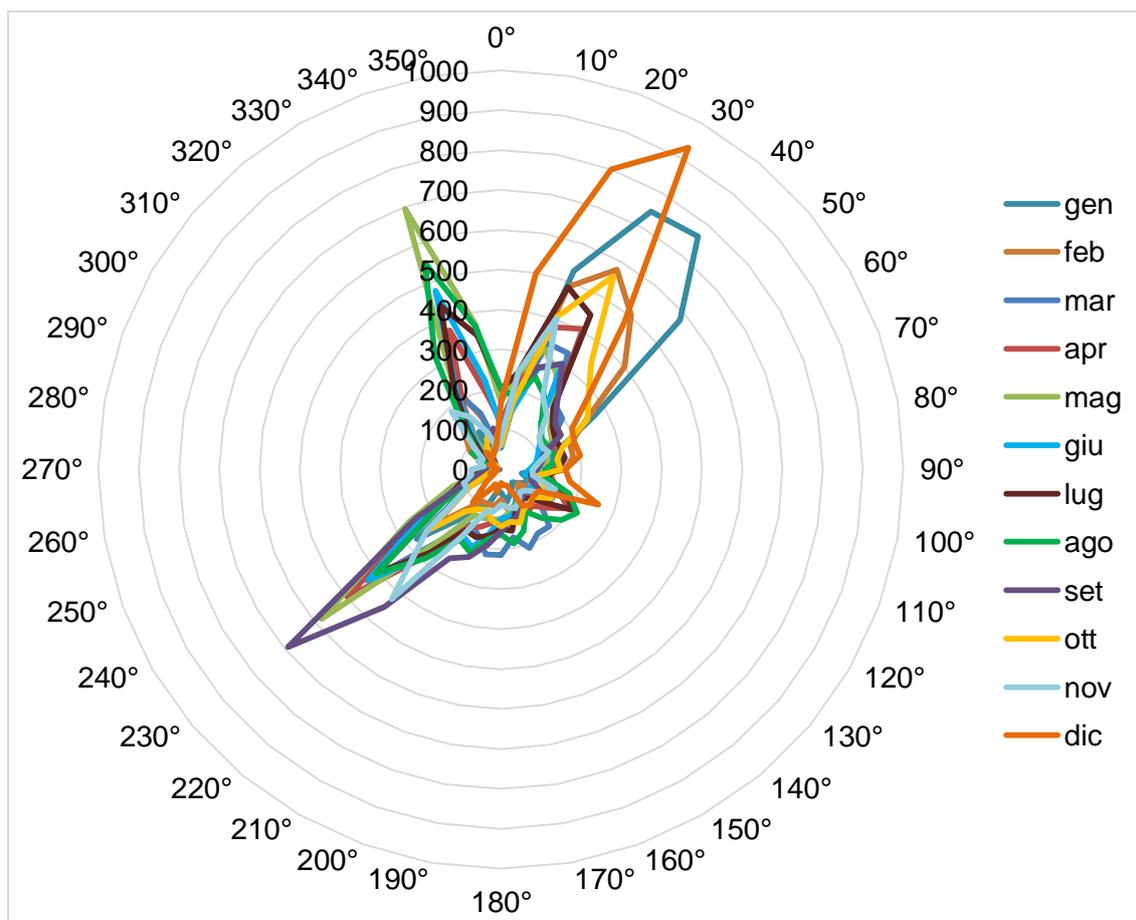


Figura 6.18: il grafico rappresenta le occorrenze mensili per intervalli direzionali pari a 10°.

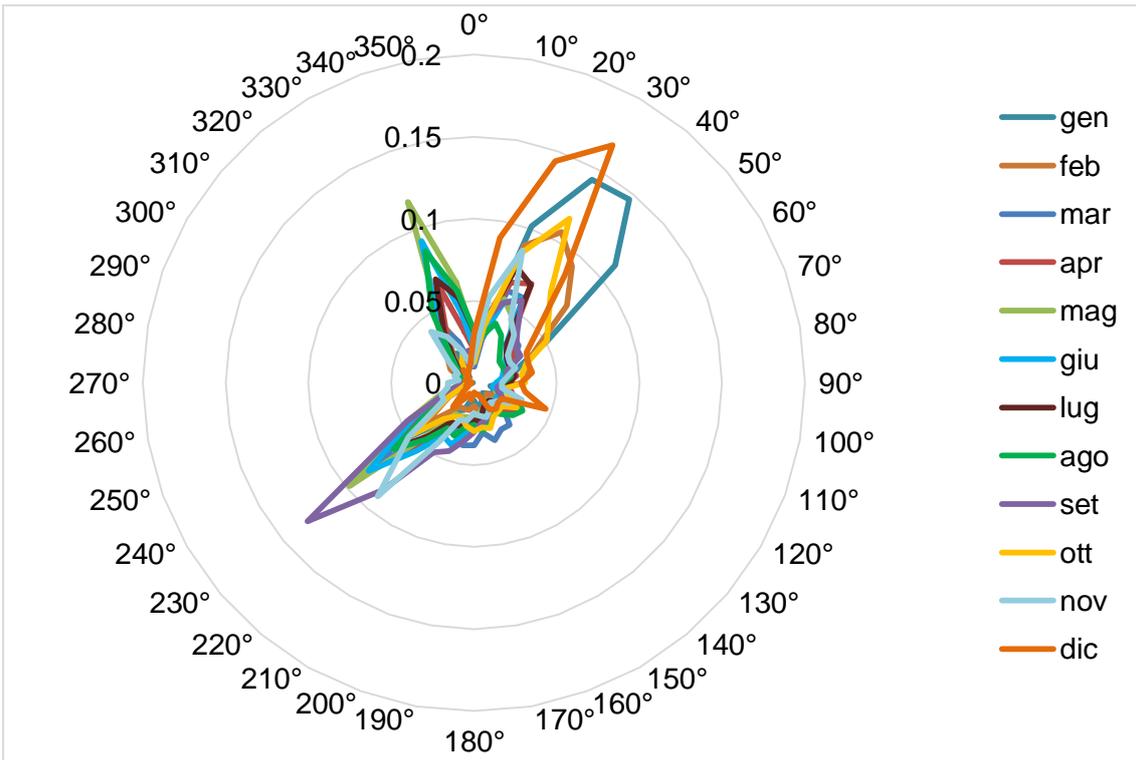


Figura 6.19: il grafico rappresenta le occorrenze mensili normalizzate per intervalli direzionali pari a 10°. La somma delle frequenze registrate per ogni singolo intervallo, appartenenti allo stesso mese, darà un valore pari ad uno.

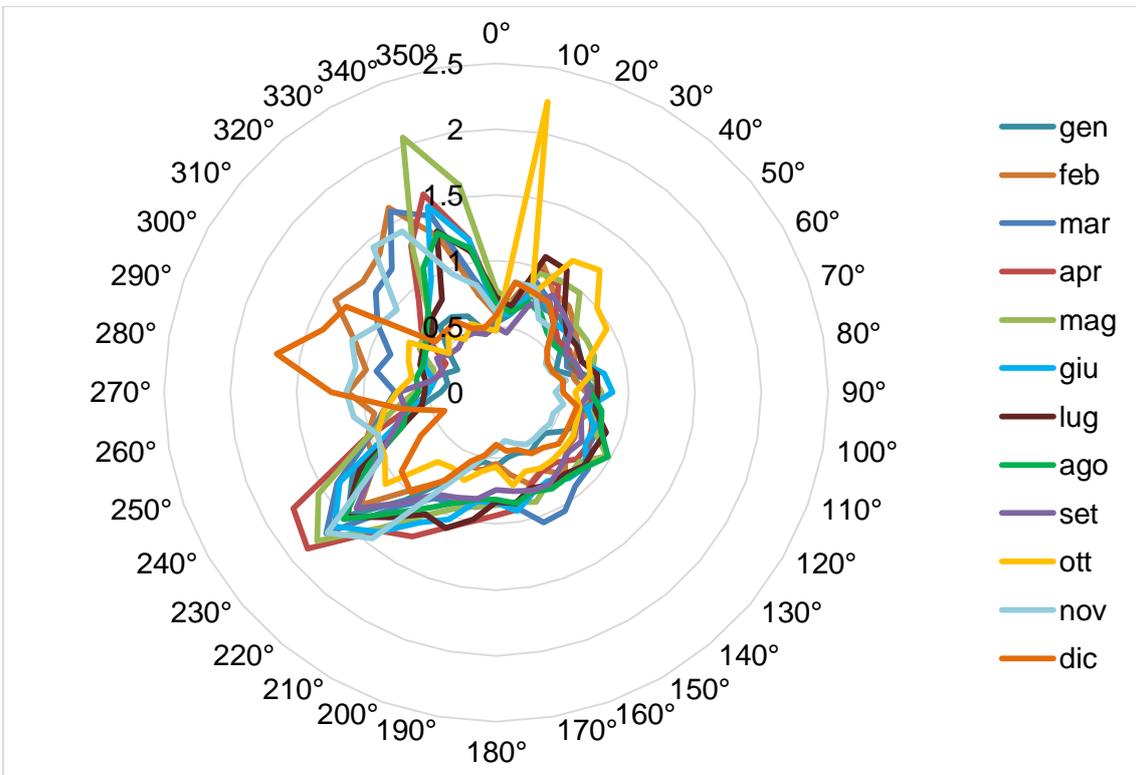


Figura 6.20: il grafico rappresenta la velocità media (m/s) del vento per intervalli direzionali pari a 10° a seconda dei mesi.

6.3.1.2 La temperatura ambiente

Nella Figura 6.21 è indicato l'andamento annuale delle temperature giornaliere registrate dalla stazione Hobo nell'arco di tutto il 2014.

Di primo acchito è possibile notare la presenza di due discontinuità nel grafico.

Infatti, come accennato in precedenza, in corrispondenza dell'ondata di caldo tra il 7 e l'11 Giugno il data-logger ha smesso di funzionare. In quei giorni alla stazione di Borgo Panigale (BO), nei pressi dell'aeroporto, a una distanza quindi di circa 5 km in linea d'aria dal Lazzaretto, si sono registrati valori superiori a 30°C (51).

Non si dispone, invece, dei dati tra il 17 ed il 19 Maggio per ragioni tecniche. In quei giorni alla stazione di Borgo Panigale si sono registrati valori di circa 18°C (52).

Attira l'attenzione anche il brusco calo delle temperature registrato durante l'ultima settimana di Ottobre, a causa di una depressione artica proveniente dal nord Europa.

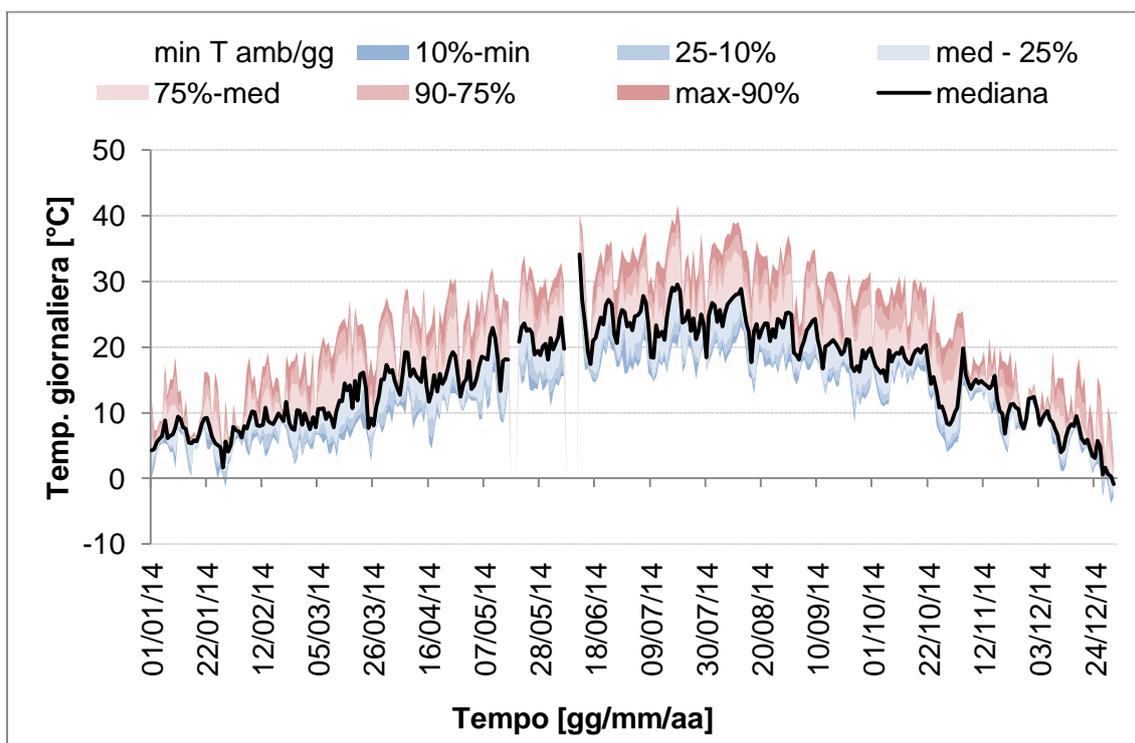


Figura 6.21: il grafico rappresenta l'andamento della temperatura ambientale registrato durante il corso di tutto il 2014 da parte della stazione Hobo. La linea in grassetto rappresenta la temperatura mediana giornaliera. Le fasce in rosso, dall'alto verso il basso, rappresentano la temperatura massima, il novantesimo ed il settantacinquesimo percentile riferita ad ogni giorno. Le fasce in blu, dal basso verso l'alto, invece rappresentano la temperatura minima, il decimo ed il venticinquesimo percentile.

Dal grafico si evidenzia inoltre come il valore mediano di temperatura non sia perfettamente centrato, ma si discosti verso il basso. La spiegazione di questo consiste nei picchi di temperatura che si registrano nelle ore centrali del giorno, di breve durata ma alta intensità.

In Tabella 6.7 vengono riportati i valori massimi, medi e minimi di temperatura registrati mensilmente.

6.3.1.3 Le piogge

Il 2014 è stato un anno abbastanza piovoso. Se mediamente a Bologna si registrano circa 700 mm di pioggia all'anno, durante quello appena terminato ne sono caduti ben 944.

Tendenzialmente tutti i mesi si sono rivelati più piovosi rispetto ai dati storici registrati dalla stazione di Borgo Panigale nel trentennio 1971-2000 (Figura 6.22), ad eccezione del mese di Agosto, di quello di Ottobre e di Novembre.

Il mese più piovoso si è rivelato essere Luglio, seguito a poca distanza da Settembre e Gennaio. Quello meno piovoso è stato, invece, Agosto con soli 16.20 mm/mese.

	T max (°C)	T media (°C)	T min (°C)
gen-14	18.49	6.66	-1.30
feb-14	19.56	9.12	2.10
mar-14	27.63	12.32	2.53
apr-14	30.52	16.24	4.53
mag-14	34.02	19.51	8.39
giu-14	40.14	23.55	10.91
lug-14	41.71	24.61	14.74
ago-14	39.09	25.17	12.85
set-14	34.97	20.62	8.42
ott-14	30.95	17.51	3.98
nov-14	24.00	12.06	6.00
dic-14	19.39	6.69	-3.81

Tabella 6.7: temperature ambientali mensili (massime, medie e minime) registrate dalla stazione Hobo nell'arco del 2014.

Nella maggior parte dei casi si è verificata solo della pioviggine (Figura 6.23), ovvero una precipitazione di intensità oraria compresa tra 0.1 ed 1 mm/h, ma durante il mese di Giugno (14/06/14) si è anche scatenato un nubifragio, ossia un evento di pioggia con intensità oraria superiore a 30 mm/h. Si faccia riferimento alla Figura 6.24 per comprendere l'andamento mensile in funzione dell'intensità.

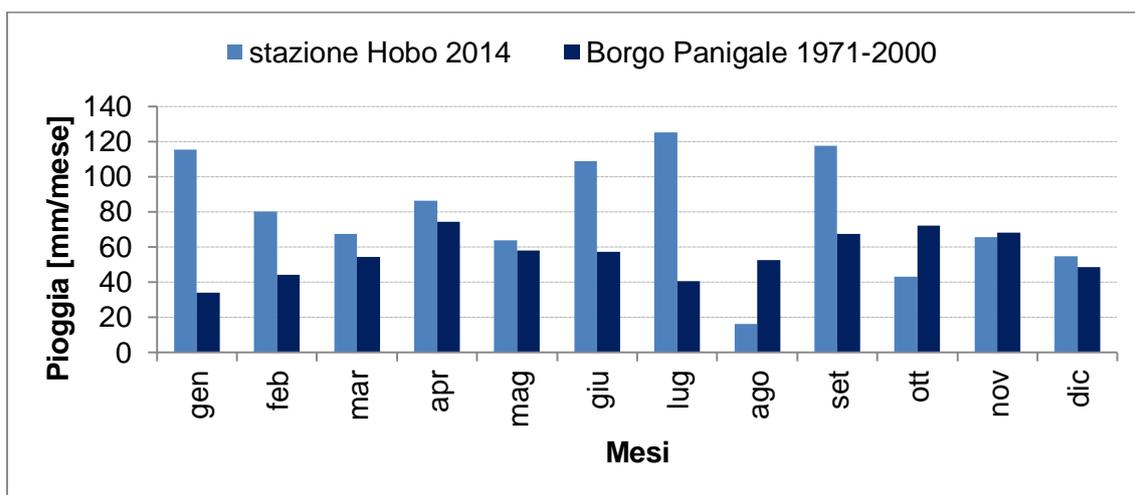


Figura 6.22: confronto tra l'andamento mensile delle piogge registrate nel 2014 dal data-logger della Hobo con le medie riportate dalla stazione di Borgo Panigale nel trentennio tra il 1971 ed il 2000 (53)

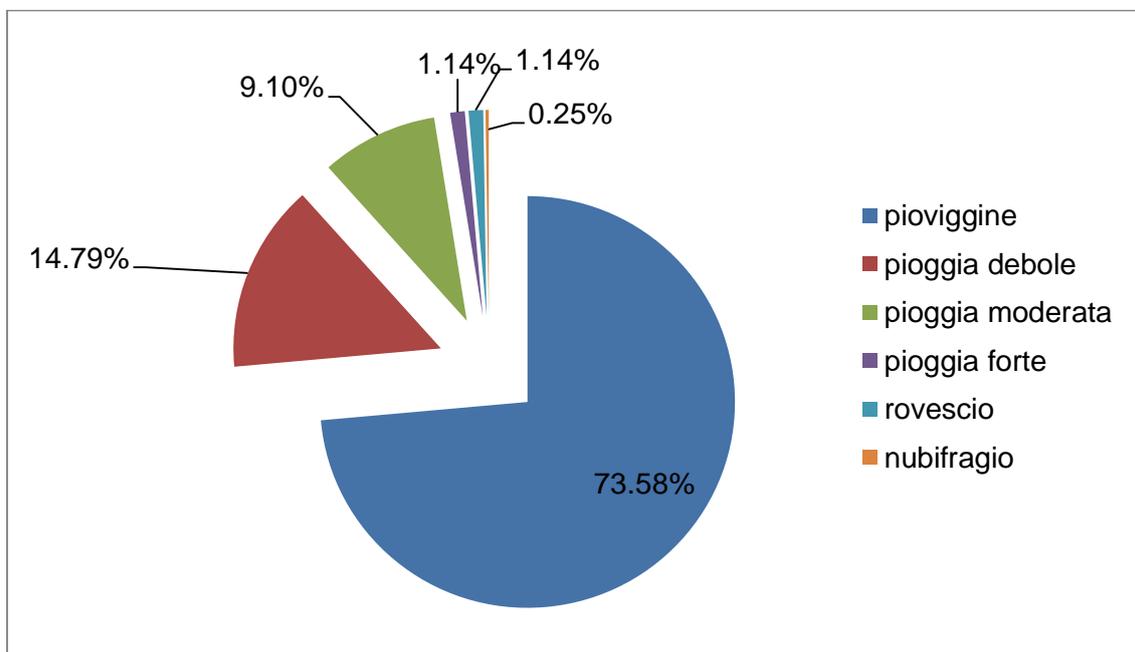


Figura 6.23: tipi di pioggia presentatisi durante il 2014 in funzione dell'intensità (mm/h). Con pioviggine si intende un'intensità pluviometrica inferiore a 1 mm/h, con pioggia debole valori compresi tra 1-2 mm/h, con pioggia moderata valori compresi tra 2-6 mm/h e con pioggia forte valori compresi tra 6-10 mm/h. Per intensità di pioggia superiori a 10 mm/h si parla di rovesci. Se questa è addirittura superiore a 30 mm/h allora si parla di nubifragi.

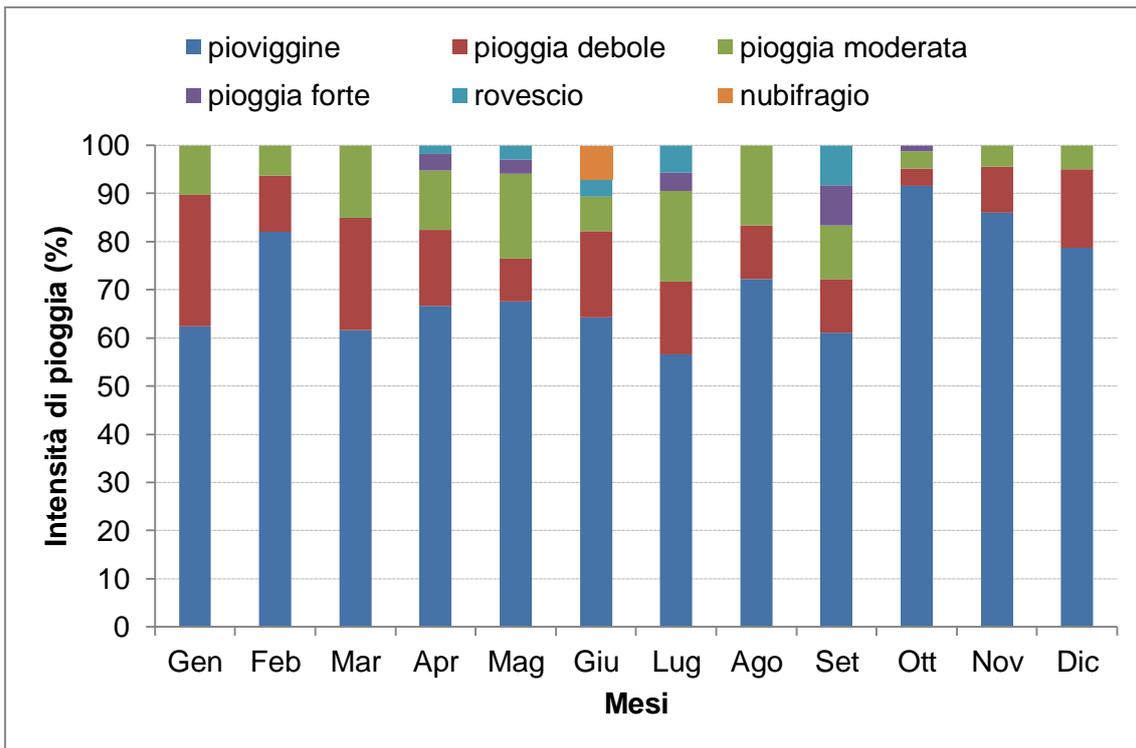


Figura 6.24: distribuzione percentuale delle piogge in funzione della propria intensità oraria, calcolata durante i mesi dell'anno 2014.

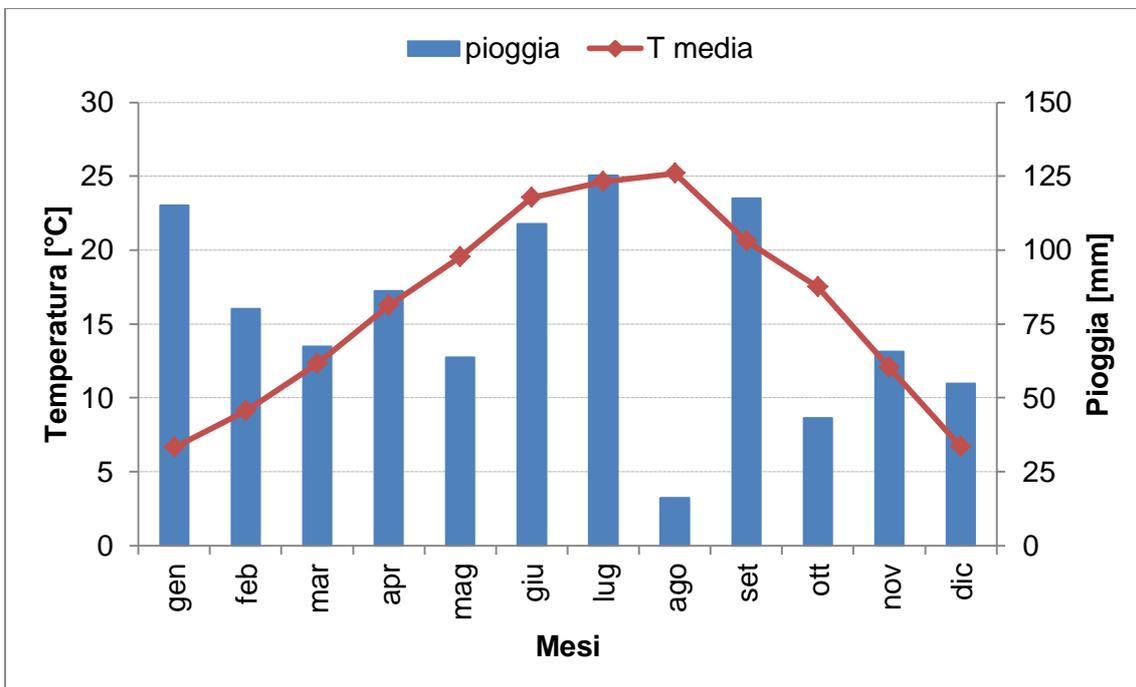


Figura 6.25: climatogramma o diagramma di Walter e Lieth, calcolato per il sito oggetto di studio in funzione dei parametri termo-pluviometrici registrati durante il 2014.

Noti i valori termo-pluviometrici mensili è possibile tracciare il diagramma di Walter e Lieth (Figura 6.25), che prende anche il nome di climatogramma. In questo modo si distingue la stagione secca corrispondente al periodo estivo, fatta eccezione per questo Luglio caratterizzato da un'anomala piovosità, da quella umida invernale.

Tale diagramma assume un'importanza fondamentale nella scelta delle specie vegetali da collocare sul tetto.

6.3.2 Andamento delle temperature

Grazie al posizionamento delle sonde afferenti al mini-registratore FT-90/USB-HT2 è possibile studiare l'andamento specifico delle temperature relative al Green ed al Reference Roof.

Dal mese di Ottobre in poi si sono sfruttati anche i valori registrati dalle termocoppie.

A Settembre è invece possibile studiare le immagini scattate dalla termocamera.

6.3.2.1 Il mese di Giugno

Si riportano di seguito i box-plot relativi al mese di Giugno in cui le sonde erano disposte sulla guaina bituminosa (Figura 6.26) ed in corrispondenza del tetto verde coltivato a Sedum a livello superficiale, indicativamente a -0.5 cm (Figura 6.27).

In statistica il box-plot, detto anche box and whiskers plot (diagramma a scatola e baffi), è una rappresentazione grafica utilizzata per descrivere la distribuzione di un campione tramite semplici indici di dispersione e di posizione. Esso viene rappresentato (orientato orizzontalmente o verticalmente) tramite un rettangolo diviso in due parti, da cui escono due segmenti. Il rettangolo (la "scatola") è delimitato dal primo e dal terzo quartile, $q_{1/4}$ e $q_{3/4}$, e diviso al suo interno dalla mediana, $q_{1/2}$. I segmenti (i "baffi") sono delimitati dal minimo e dal massimo dei valori. In questo modo vengono rappresentati graficamente i quattro intervalli ugualmente popolati delimitati dai quartili.

Tornando al mese in questione, si noti che i giorni, indicati sull'asse delle x, si estendono solo fino al 23 Giugno in quanto esso corrisponde all'ultima data in cui la sonda del GR si è trovata in quella posizione. Dal giorno successivo è stata infatti spostata a -10 cm.

Durante il mese considerato, nel GR si verifica un'escursione termica giornaliera media pari a 25.4°C, mentre sul RR essa equivale a 35.1°C, quindi quasi 10°C maggiore.

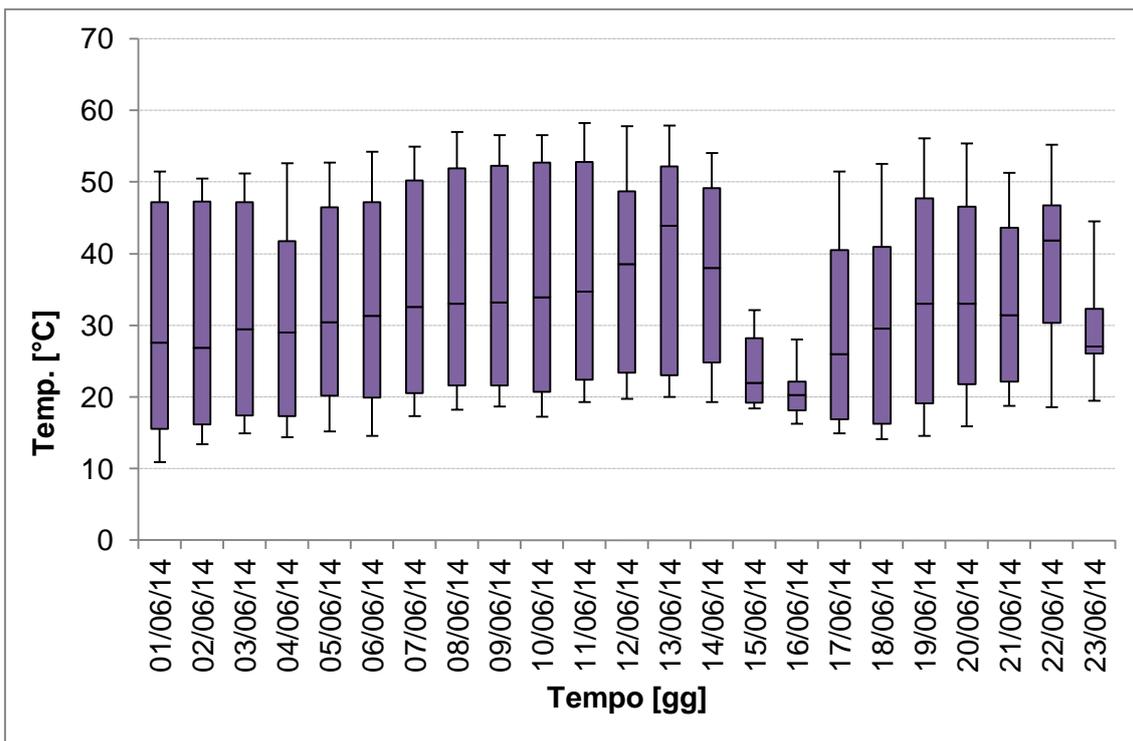


Figura 6.26: box-plot relativi alle temperature del RR registrate durante il mese di Giugno. Nel grafico sono indicati i valori massimi e minimi giornalieri rappresentati tramite segmenti, il venticinquesimo percentile, la mediana ed il settantacinquesimo percentile nella parte piena rettangolare.

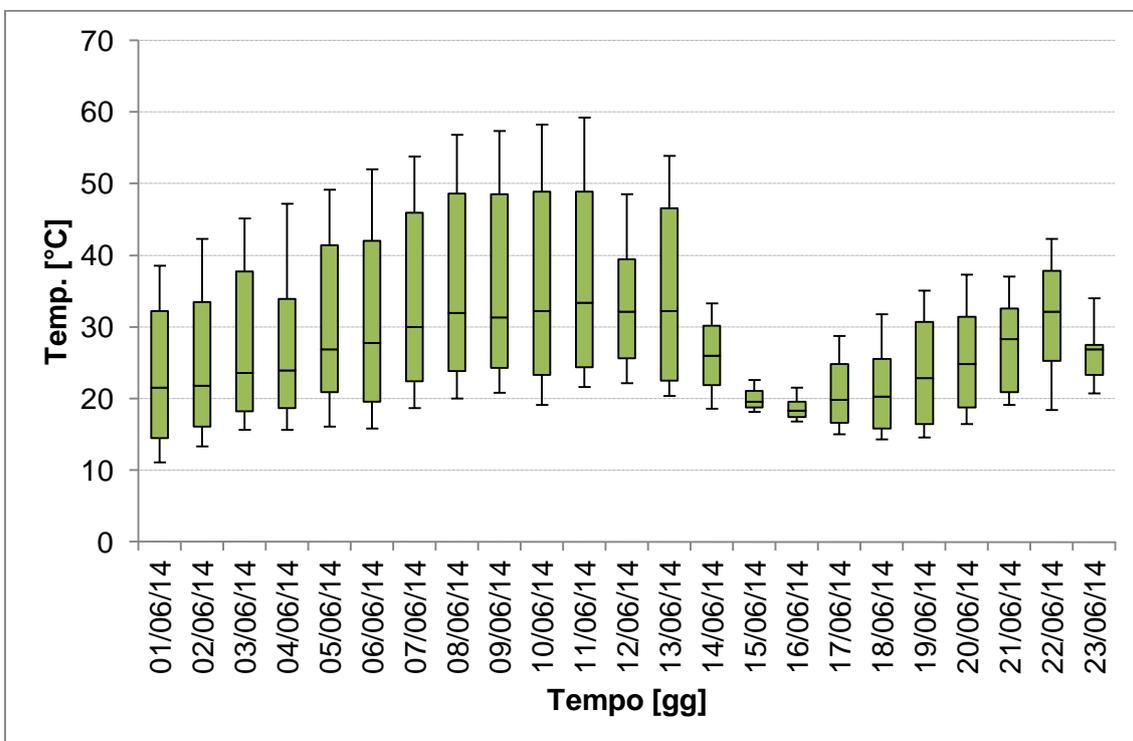


Figura 6.27: box-plot relativi alle temperature del GR (-0.5 cm) registrate durante il mese di Giugno. Nel grafico sono indicati i valori massimi e minimi giornalieri rappresentati tramite segmenti, il venticinquesimo percentile, la mediana ed il settantacinquesimo percentile nella parte piena rettangolare.

Nei giorni del 15 e del 16 Giugno si verifica un evento di pioggia, che provoca un notevole abbassamento della temperatura ambiente e di conseguenza di quella delle sonde. Il GR impiega quasi una settimana per riottenere i valori di temperatura che aveva prima della pioggia, mentre per la guaina bituminosa è sufficiente il suo cessare per tornare agli alti valori precedenti.

Nonostante manchino i dati ambientali della stazione Hobo tra il 7 e l'11 Giugno, è possibile avere un'idea delle altissime temperature raggiunte sulla copertura del LAGIRN facendo riferimento ai valori delle sonde FT-90 di quel periodo. Difatti si registrano valori massimi sia per il tappeto a *Sedum* che per la guaina che rasentano i 60°C.

Si propone inoltre uno zoom in data 18 Giugno per apprezzare l'andamento delle temperature registrate dalla sonda bicanale, in rapporto alla temperatura ambiente e alla radiazione solare (Figura 6.28).

Si ritiene questa data significativa in quanto si tratta di una limpida giornata di sole, come si può notare dall'andamento della linea gialla che rappresenta la radiazione solare.

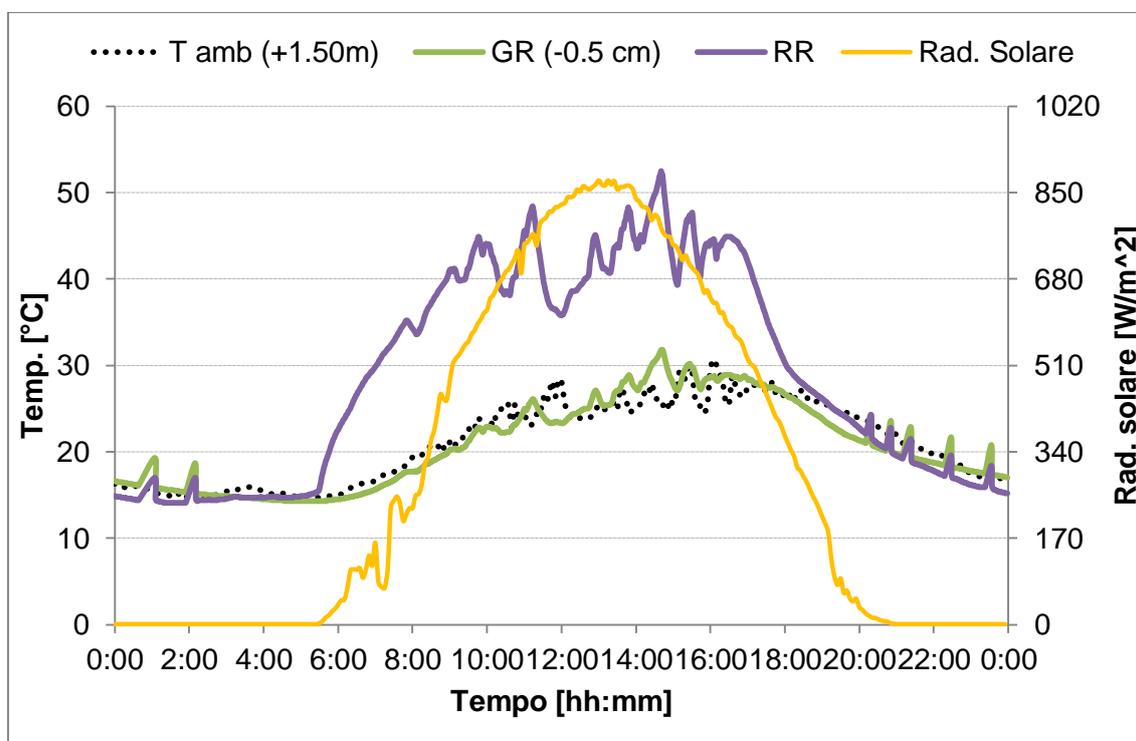


Figura 6.28: andamento della temperatura registrata dalla sonda nel Green e nel Reference Roof durante il 18 giugno 2014, in funzione della temperatura ambiente e della radiazione solare.

Dal grafico si evince come la temperatura del RR risenta delle oscillazioni di quella ambientale; infatti la prima inizia ad aumentare rapidamente all'alba e con l'avanzare delle ore presenta dei picchi proprio in corrispondenza di quelli della temperatura ambiente, fino a raggiungere i valori massimi verso le 15.

Anche il GR segue il profilo della temperatura ambientale, ma a differenza del RR, subisce oscillazioni molto minori, discostandosi solo di qualche grado dalla temperatura registrata a +1.50 m.

6.3.2.2 Il mese di Luglio

Si riportano i box-plot concernenti il mese di Luglio in cui le sonde erano disposte sulla guaina bituminosa (Figura 6.29) ed in corrispondenza del tetto verde coltivato a Sedum all'interno del substrato, indicativamente a -10 cm di profondità (Figura 6.30).

Si può notare come le temperature del Reference si siano mantenute con valori massimi mediamente attorno ai 50°C e con valori minimi mediamente di circa 18°C, così come avveniva nel mese precedente. Per quanto concerne il Green Roof, invece, i valori massimi di temperatura all'interno del substrato si sono aggirati attorno ai 31°C e quelli minimi attorno ai 22°C.

Durante il mese considerato, nel GR si verifica un'escursione termica giornaliera media di circa 9°C, mentre sul RR essa equivale pressappoco a 33°C, quindi ben 24°C maggiore. Con l'aumento delle temperature ambientali si nota come la differenza nelle prestazioni termiche del tetto verde e della guaina bituminosa sia più evidente.

Si riportano adesso alcuni andamenti significativi delle temperature registrate dal mini-registratore FT-90/USB-HT2.

In Figura 6.31 - Figura 6.32 è rappresentato l'andamento della temperatura relativa al tetto coltivato a Sedum (GR) ed a quello rivestito da guaina bituminosa (RR), in funzione della temperatura ambientale e della radiazione solare, nella giornata del 7 e del 19 Luglio.

La prima è una calda e luminosa giornata estiva, durante l'arco della quale, nelle ore tra le 14 e le 16, si presentano degli annuvolamenti, desumibili dall'andamento altalenante della radiazione solare in quell'intervallo orario.

La seconda, invece, viene riportata in quanto si è rivelata essere la giornata con massima temperatura ambientale dell'anno. Dall'andamento della radiazione solare si può desumere che si trattasse di una giornata di cielo limpido.

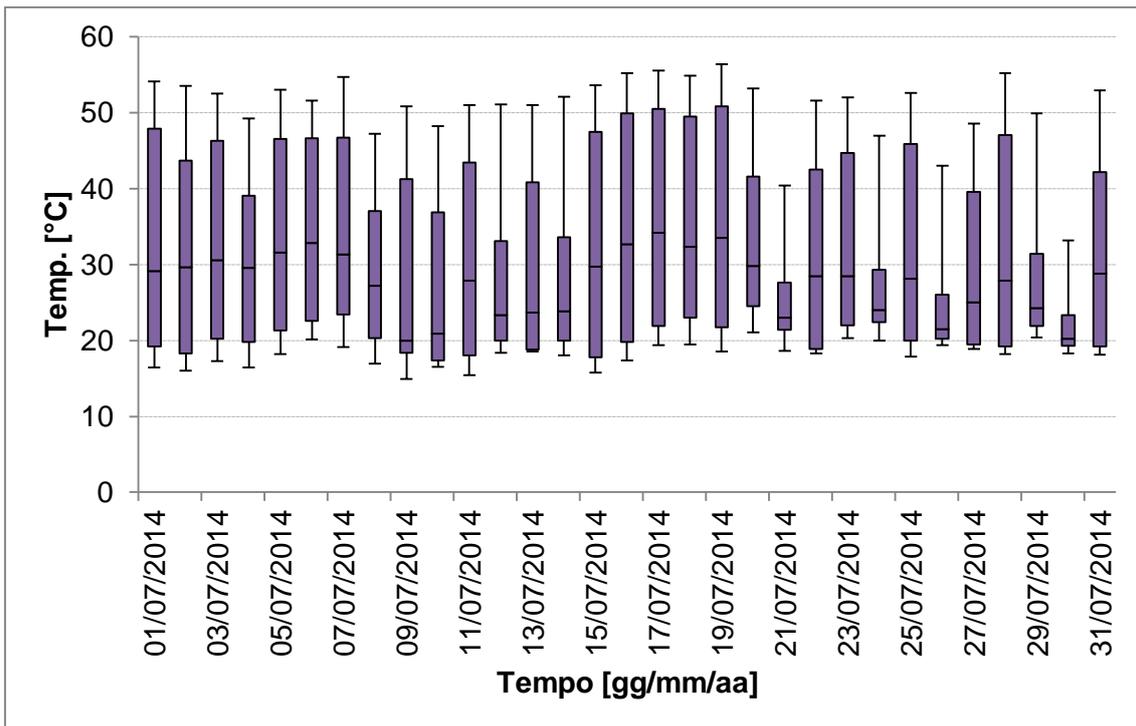


Figura 6.29: box-plot relativi alle temperature del RR registrate durante il mese di Luglio. Nel grafico sono indicati i valori massimi e minimi giornalieri rappresentati tramite segmenti, il venticinquesimo percentile, la mediana ed il settantacinquesimo percentile nella parte piena rettangolare.

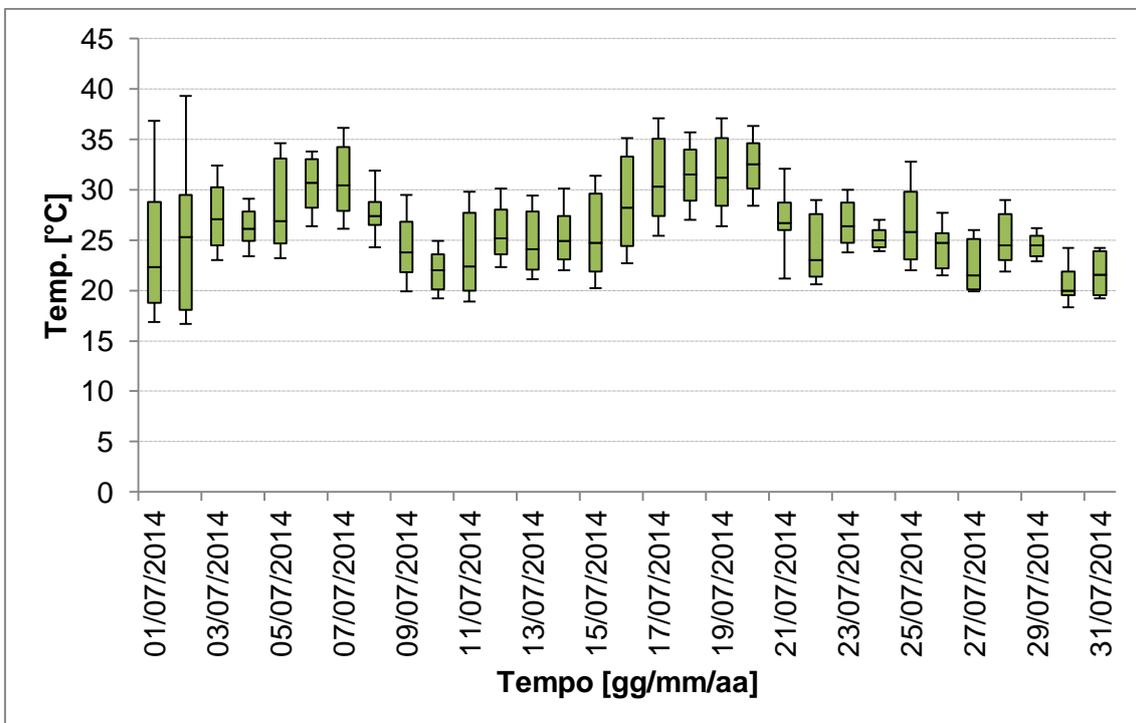


Figura 6.30: box-plot relativi alle temperature del GR (-10 cm) registrate durante il mese di Luglio. Nel grafico sono indicati i valori massimi e minimi giornalieri rappresentati tramite segmenti, il venticinquesimo percentile, la mediana ed il settantacinquesimo percentile nella parte piena rettangolare.

In entrambi i grafici si evidenzia come l'andamento della temperatura del RR rifletta quello della temperatura ambientale, sia nei valori di massimo che di minimo. Nello specifico la temperatura della guaina risulta superiore a quella della stazione Hobo durante il giorno, raggiungendo anche valori attorno ai 55°C, mentre è inferiore di un paio di gradi durante le ore notturne.

Differentemente si comporta il Green Roof per cui si manifesta uno sfasamento ed un'attenuazione del picco termico, dovuti all'inerzia del pacchetto. Lo sfasamento risulta essere di circa 4 ore per la giornata del 7 Luglio e di circa 2 h 30 per il 19 Luglio. Quest'ultimo valore risulta essere inferiore rispetto a quello prima giornata a causa delle temperature più alte raggiunte. Per quanto concerne l'attenuazione della temperatura massima da parte del GR si nota come in entrambe le giornate la temperatura di quest'ultimo sia inferiore di circa 20°C rispetto al picco relativo al RR. Inoltre in generale le oscillazioni giornaliere di temperatura registrate dal GR sono molto inferiori rispetto a quelle a cui è soggetto il Reference. Nello specifico si parla di 10°C contro circa 35°C.

Essendo stato Luglio il mese più piovoso dell'anno, è interessante notare l'andamento delle temperature del GR e del RR in occasione di due eventi di pioggia.

Considerando che per differenziare due eventi di pioggia si dovrebbe considerare la mancata generazione di deflusso tra un evento ed il successivo, visto il rilascio lento del tetto verde si stima che 24 ore possano essere più che sufficienti a questo scopo. Pertanto all'interno del presente studio si definisce evento di pioggia quell'evento per cui non si genera più deflusso a distanza di un giorno.

Sulla base di questa decisione sono stati scelti gli eventi dell'8 Luglio e quelli del 26 (Figura 6.33 - Figura 6.34), in quanto il primo caratterizzato da un'intensità nella media ($i_{\max} = 2.20$ mm/h) ed il secondo molto intenso ($i_{\max} = 24.40$ mm/h). Si presti attenzione all'asse della pioggia che differisce di un fattore pari a dieci tra i due casi.

Durante i picchi pluviometrici si verifica una diminuzione della temperatura ambientale, a cui consegue anche un abbassamento delle temperature del GR e del RR.

Nell'evento descritto dal grafico di Figura 6.33, la pioggia raffredda la guaina bituminosa di circa 5°C rispetto al giorno precedente. Al Reference sarà necessaria circa una settimana per tornare ai valori di temperatura precedenti l'evento di pioggia (Figura 6.29).

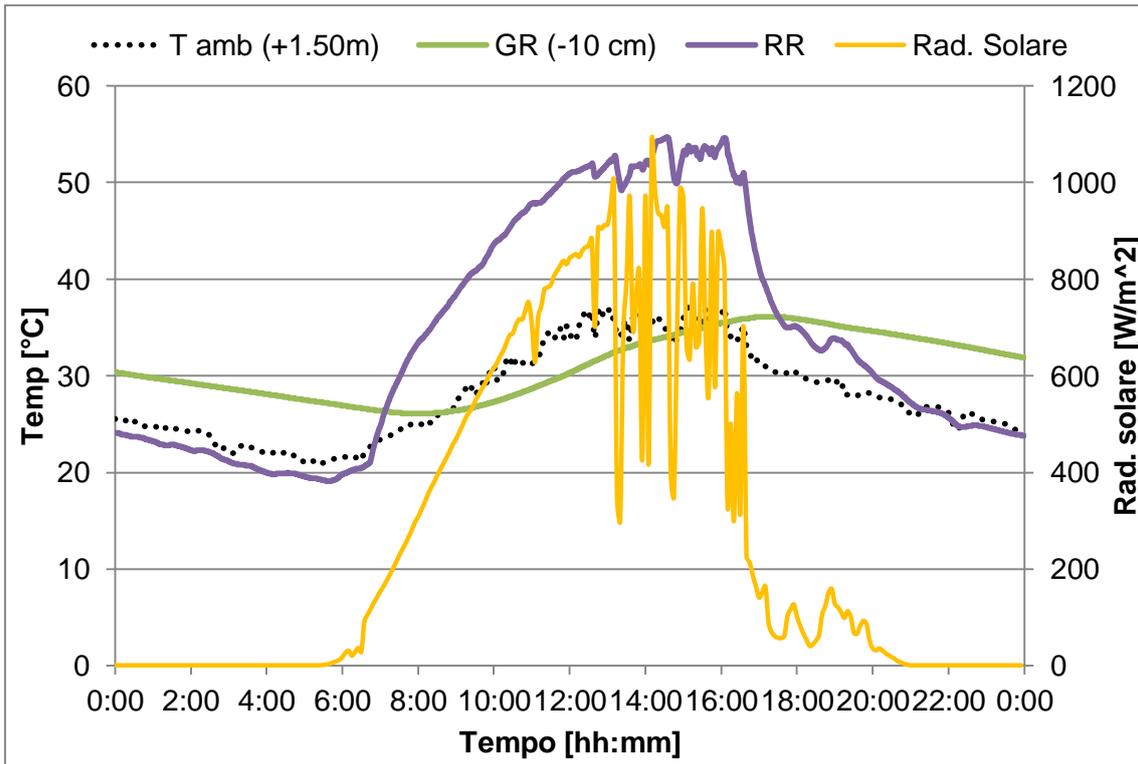


Figura 6.31: andamento della temperatura registrata dalla sonda nel Green e nel Reference Roof durante il 7 luglio 2014, in funzione della temperatura ambientale e della radiazione solare.

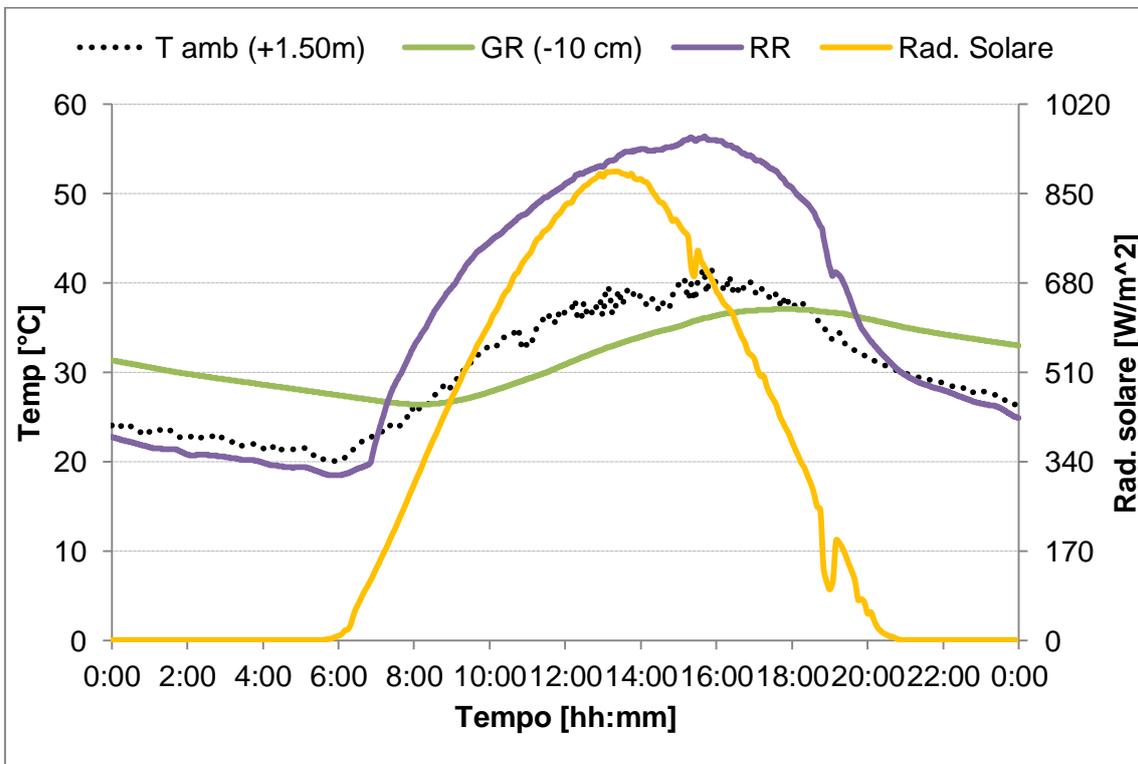


Figura 6.32: andamento della temperatura registrata dalla sonda nel Green e nel Reference Roof durante il 19 luglio 2014, in funzione della temperatura ambientale e della radiazione solare.

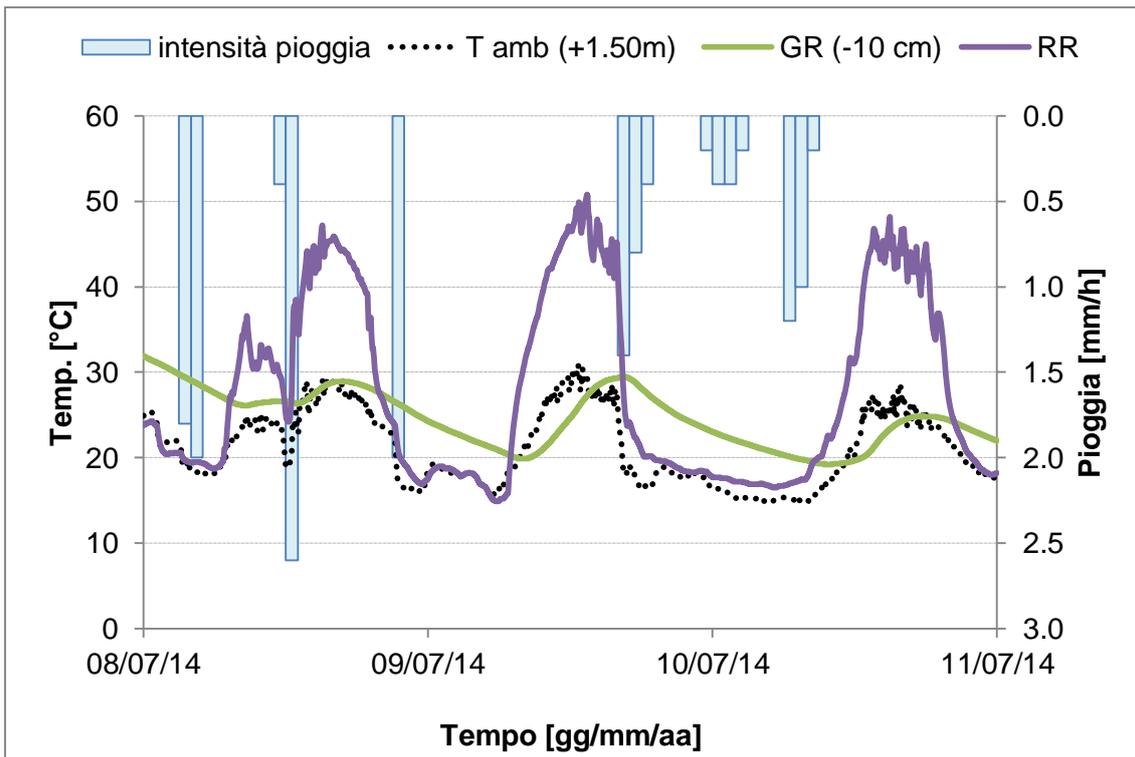


Figura 6.33: andamento delle temperature del GR e del RR, in funzione della temperatura ambiente e dell'intensità pluviometrica, in corrispondenza dell'evento di pioggia del 8-10 luglio.

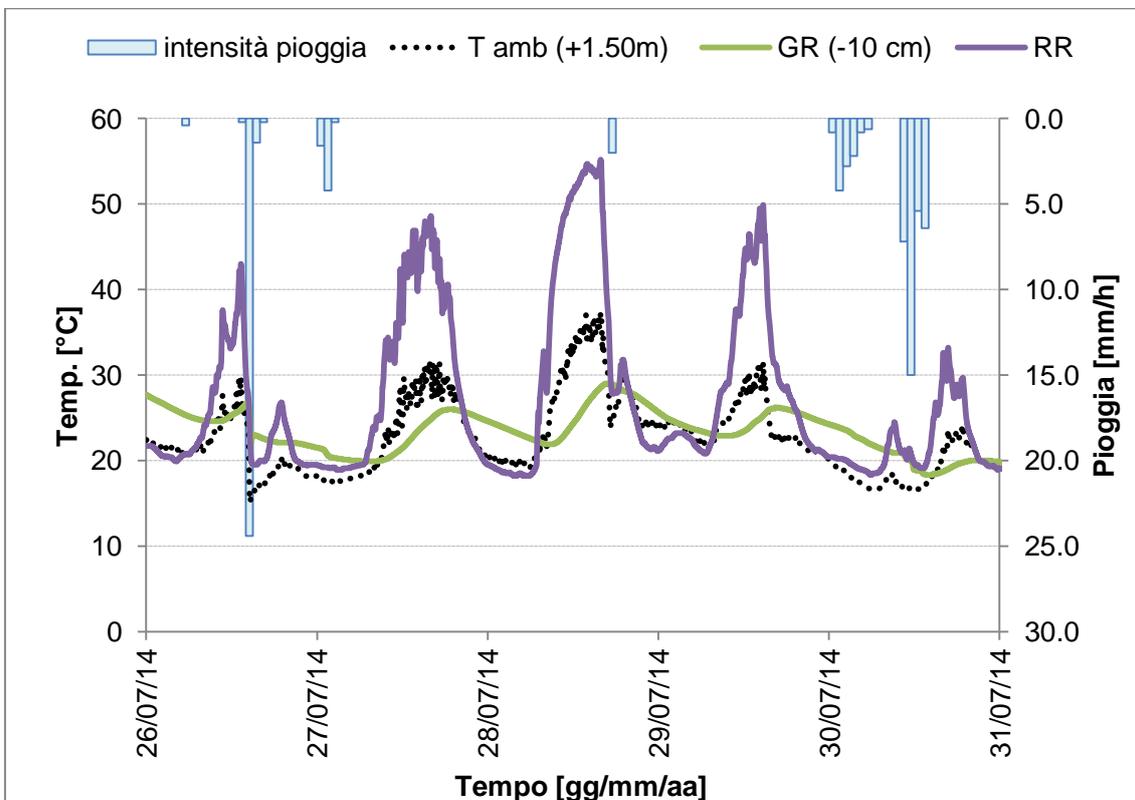


Figura 6.34: andamento delle temperature del GR e del RR, in funzione della temperatura ambiente e dell'intensità pluviometrica, in corrispondenza dell'evento di pioggia del 26-30 luglio.

Per quanto concerne il *Sedum*, anch'esso subisce un raffrescamento, ma siccome le sue oscillazioni erano già moderate rispetto a quelle del Reference, una differenza di comportamento è meno apprezzabile.

Durante la pioggia del 26 Luglio, invece, data la sua intensità, alle 14 si registra un crollo della temperatura ambientale di 10°C nell'arco di un'ora. Questo si ripercuote immediatamente anche sulle temperature del GR e del RR, che calano rispettivamente di 3.7 e di 11.5°C in sessanta minuti.

6.3.2.3 Il mese di Settembre

Si riportano in primo luogo i box-plot relativi al mese di Settembre in cui le sonde erano disposte sulla guaina bituminosa (Figura 6.35) ed in corrispondenza del tetto verde coltivato a *Sedum* all'interno del substrato, indicativamente a -10 cm di profondità (Figura 6.36).

Si può notare come le temperature del Reference si siano mantenute con valori massimi mediamente attorno ai 44°C e con valori minimi mediamente di circa 15°C. Per quanto concerne il Green Roof, invece, i valori massimi di temperatura si sono aggirati attorno ai 24°C e quelli minimi attorno ai 19°C.

Durante il mese considerato, nel GR si verifica un'escursione termica giornaliera media di circa 5°C, mentre sul RR essa equivale pressappoco a 29°C, quindi ben 24°C maggiore, così come accadeva durante Luglio.

Si noti inoltre come in data 11 e 20 Settembre si presenti un abbassamento delle temperature a causa di due eventi di pioggia, entrambi da circa 40 mm/giorno.

Il 27 Settembre si sono scattate delle immagini termografiche con l'ausilio di una termocamera, pertanto si è scelto di descrivere più nel dettaglio tale giorno (Figura 6.37).

Come evidenziato dai dati registrati dalla stazione meteo, il 27 Settembre corrisponde ad una calda giornata autunnale in cui le temperature hanno raggiunto circa i 30 °C durante le ore centrali. Nonostante ciò, risulta importante sottolineare come l'intensità della radiazione solare si attesti attorno ai 600 W/m², notevolmente sotto ai valori estivi (900-1000 W/m²).

L'andamento della temperatura del RR segue quello esaminato nei mesi precedenti. Nello specifico la sonda FT-90 registra per il Reference Roof un picco di temperatura pari a 45°C attorno alle 14.

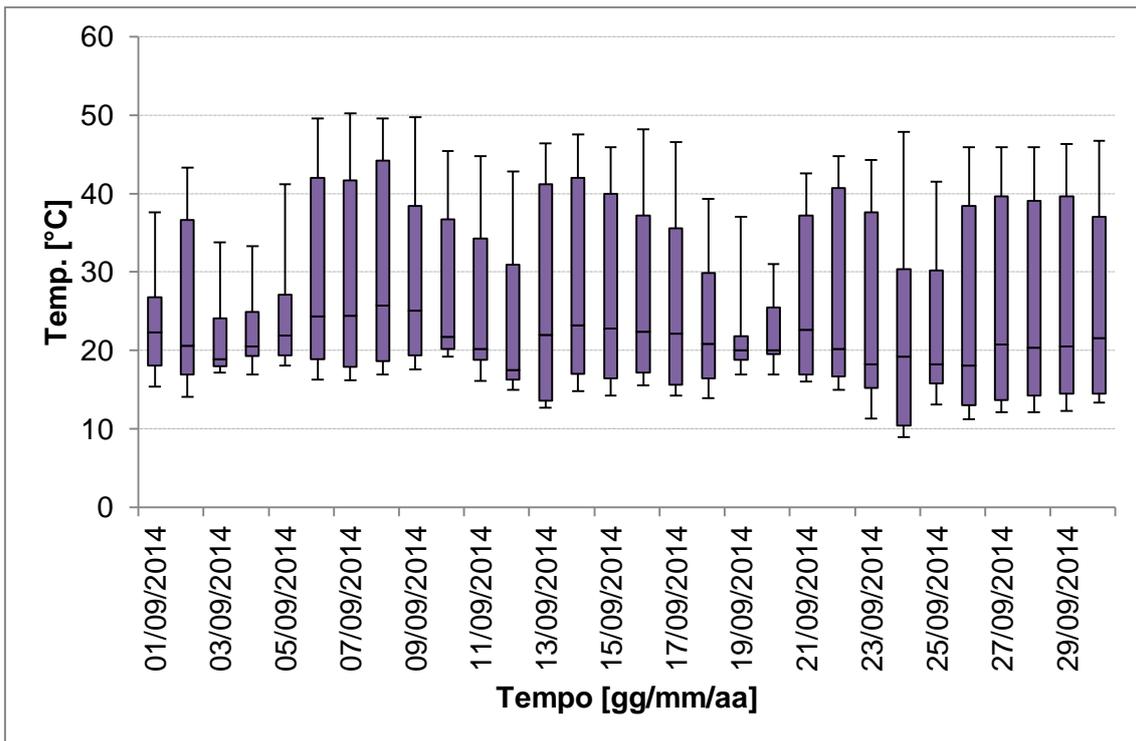


Figura 6.35: box-plot relativi alle temperature del RR registrate durante il mese di Settembre. Nel grafico sono indicati i valori massimi e minimi giornalieri rappresentati tramite segmenti, il venticinquesimo percentile, la mediana ed il settantacinquesimo percentile nella parte piena rettangolare.

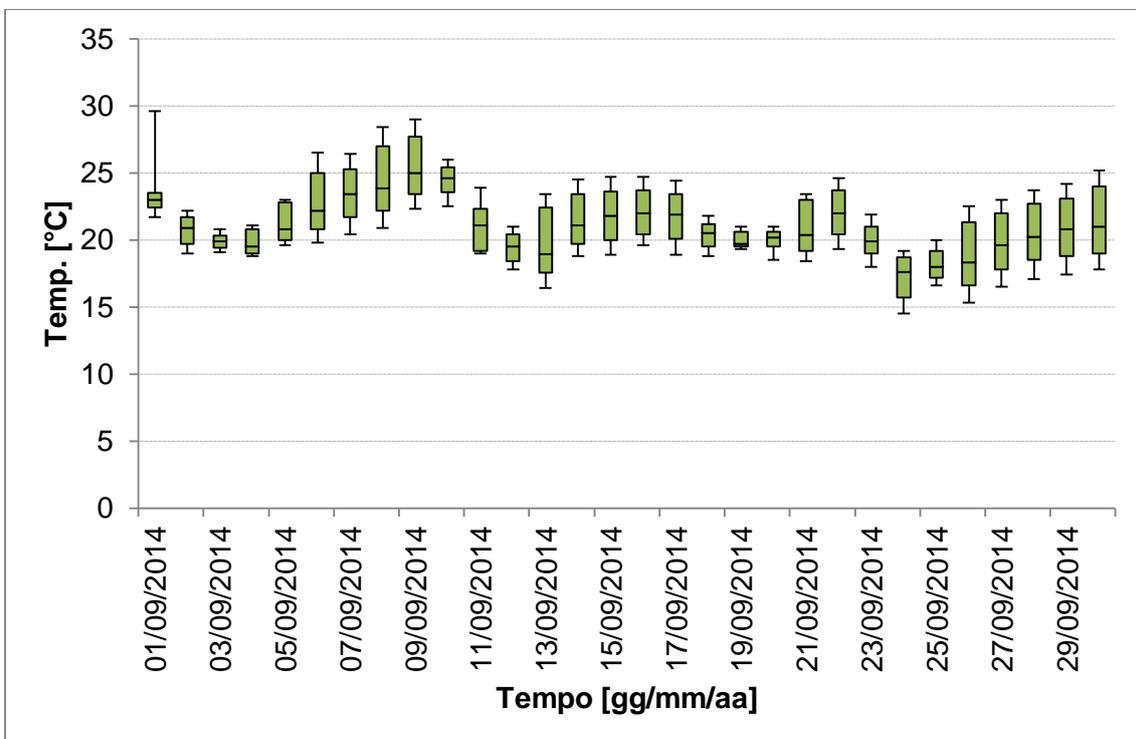


Figura 6.36: box-plot relativi alle temperature del GR (-10 cm) registrate durante il mese di Settembre. Nel grafico sono indicati i valori massimi e minimi giornalieri rappresentati tramite segmenti, il venticinquesimo percentile, la mediana ed il settantacinquesimo percentile nella parte piena rettangolare.

Il Green Roof, invece, presenta il consueto sfasamento e l'attenuazione del picco termico, dovuti all'inerzia del pacchetto. Lo sfasamento risulta essere di circa un paio ore, così come verificava nella giornata più calda di Luglio. Per quanto concerne l'attenuazione della temperatura massima da parte del GR si nota come la temperatura di quest'ultimo sia inferiore di più 20°C rispetto al picco relativo al RR.

Le termometrie ad infrarossi sono state scattate mediante l'ausilio della termocamera Fluke TiR400 durante le ore centrali della giornata al fine di investigare il comportamento dei tre tetti durante il periodo più caldo della giornata.

In Figura 6.38 è possibile notare in primo piano sulla sinistra il Sedum e sulla destra la guaina bituminosa, mentre sullo sfondo s'intravede il Native. Se il Green Roof presenta una temperatura media di 35°C, per il Reference si registra un valore pari a 52.5°C. Per quanto riguarda il Native, invece, si riporta un valore molto inferiore a quello del Sedum e precisamente di 25.1°C.

Tramite il software SmartView è possibile tracciare delle linee per cui il programma stila automaticamente dei grafici dove sono indicati sull'asse delle ascisse la distanza in centimetri dal margine sinistro dell'immagine e sulle ordinate la temperatura.

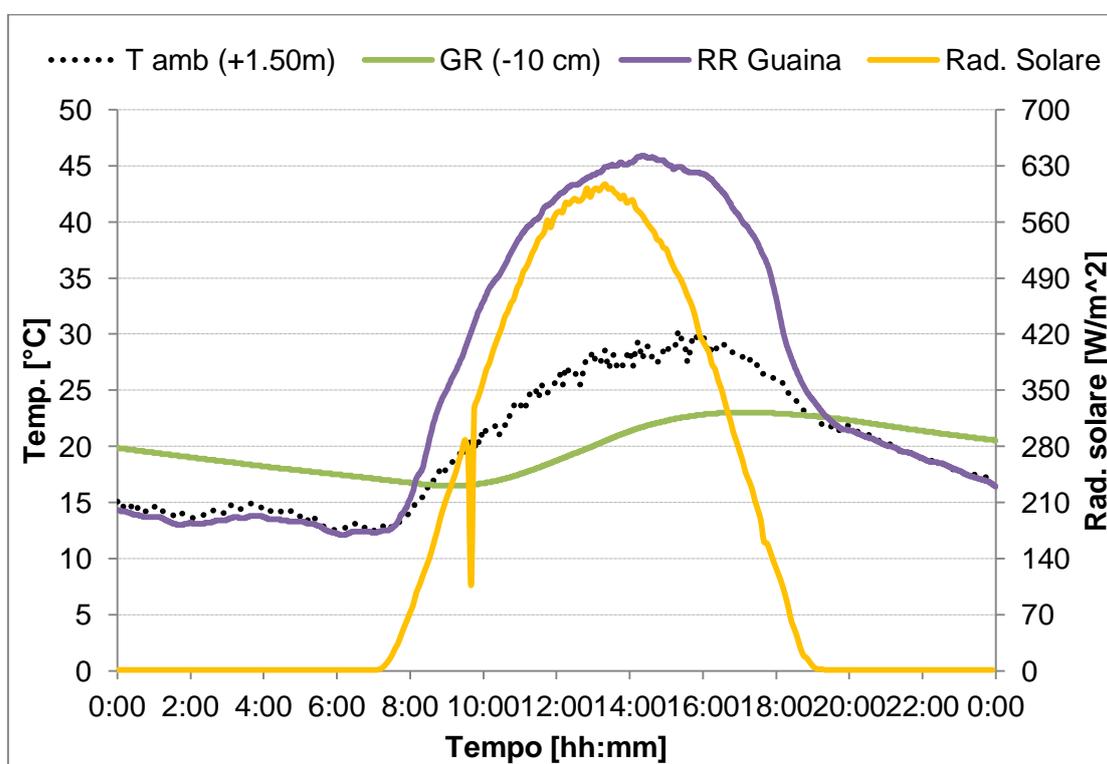


Figura 6.37: andamento della temperatura registrata dalla sonda nel Green e nel Reference Roof durante il 27 settembre 2014, in funzione della temperatura ambientale e della radiazione solare.

In questo modo è anche possibile confrontare le temperature registrate dalla sonda bicanale FT-90 con quelle fotografate dalla termocamera concernenti la guaina bituminosa. Di fatto la temperatura del RR assunta tramite la sonda risulta inferiore di circa 5°C.

Dalla comparazione tra la Figura 6.38 e le due successive si evince come a distanza di pochi minuti le temperature rilevate in corrispondenza del Native varino di almeno un paio di gradi, spaziando da 26.6°C a 30.0°C, a seconda che si considerino punti più o meno centrali. Si noti inoltre come lo strumento misuri la temperatura a livello degli steli d'erba e non a contatto col terreno.

Si osservi anche che in corrispondenza della parte rialzata del LAGIRN le temperature registrate sono più alte, a causa della prossimità con la parete vetrata più calda a

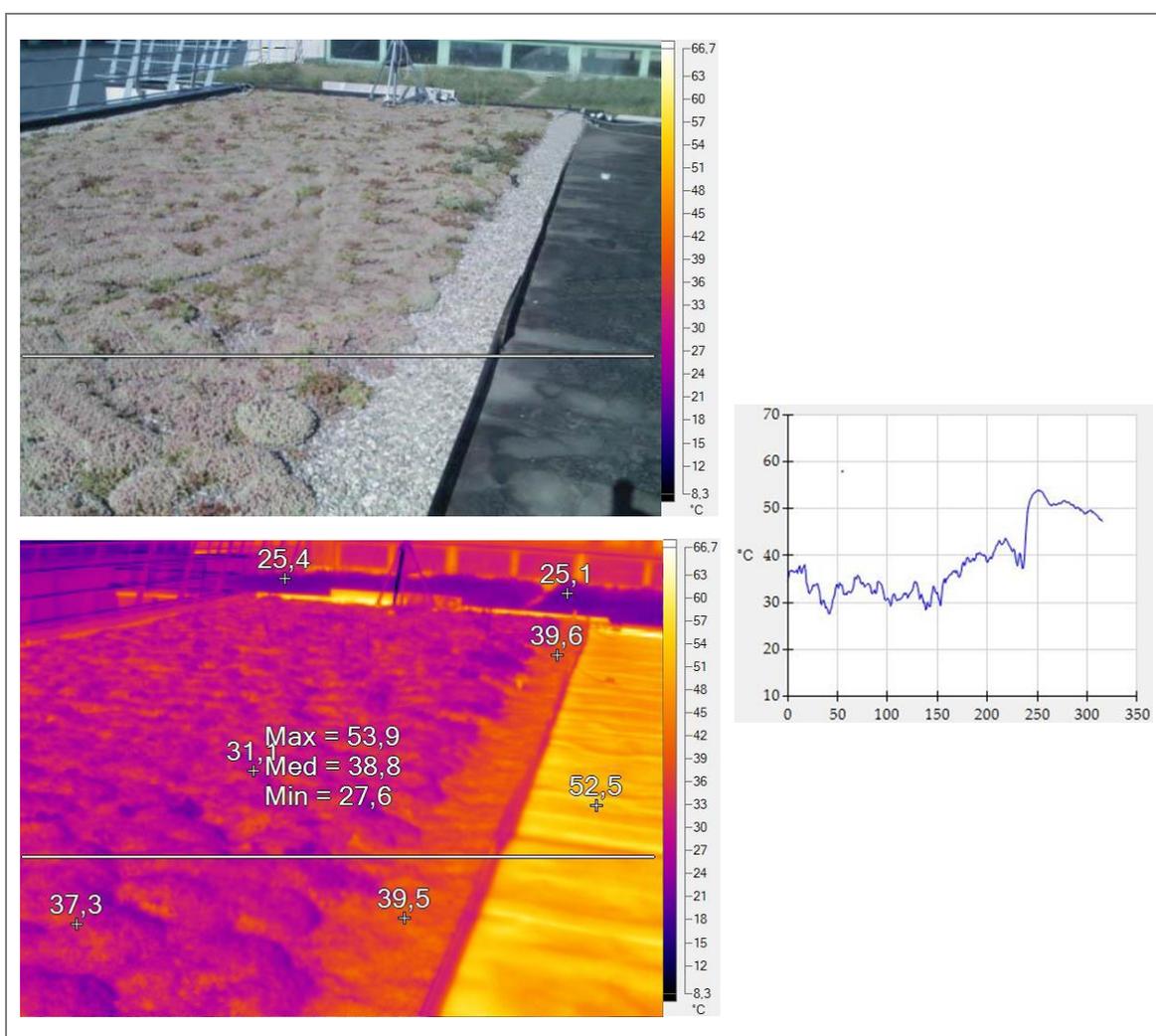


Figura 6.38: immagini del GR, RR e NA scattate con la termocamera alle 15:18:32 del 27/09/14 ed elaborate tramite il software SmartView. Il grafico sulla sinistra rappresenta l'andamento della temperatura in corrispondenza della linea bianca.

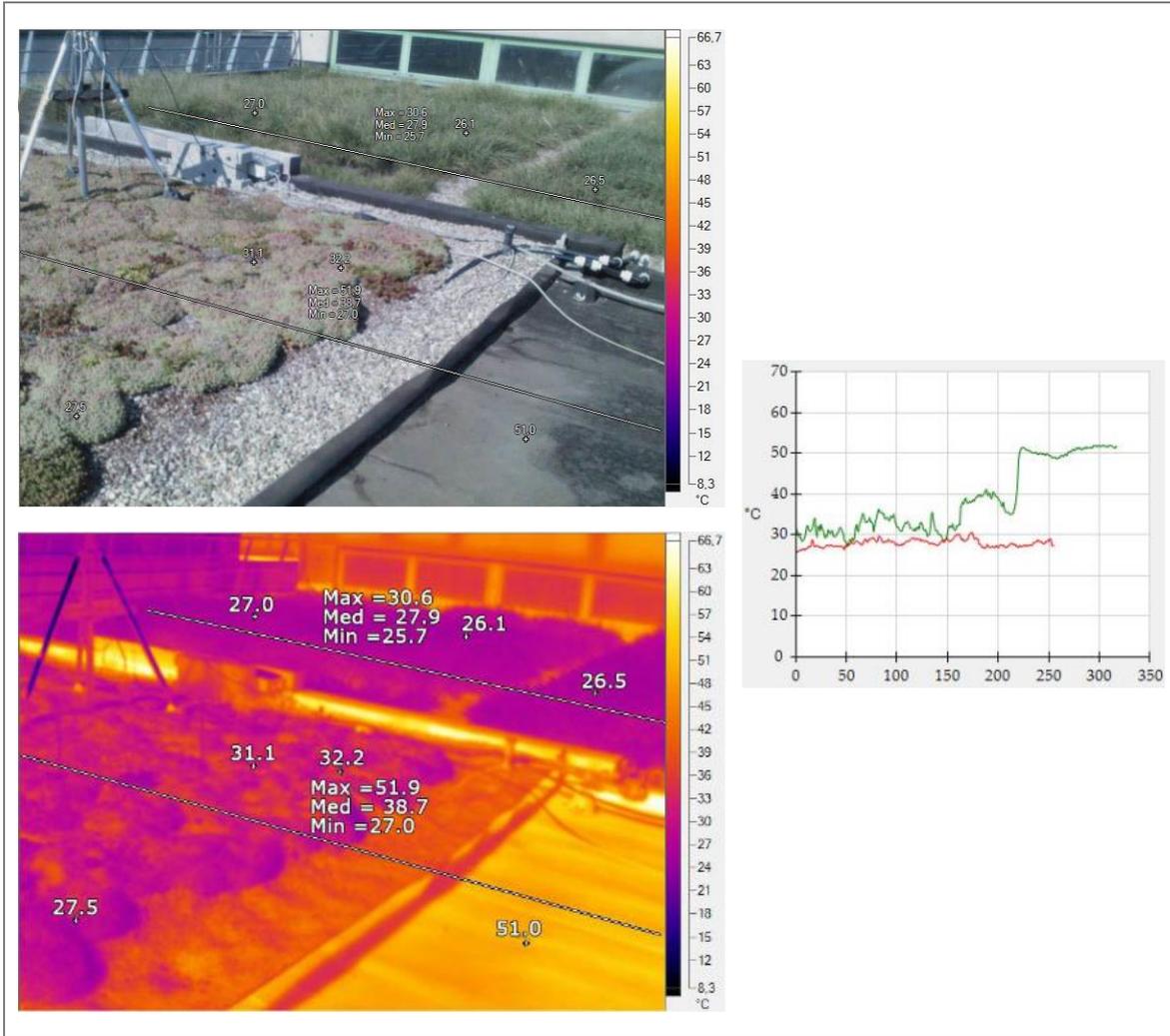


Figura 6.39: immagini del GR e del NA scattate con la termocamera alle 15:21:28 del 27/09/14 ed elaborate tramite il software SmartView. Il grafico sulla sinistra rappresenta l'andamento della temperatura in corrispondenza delle due linee (la rossa rappresenta il Native e la verde il Green ed il Reference Roof).

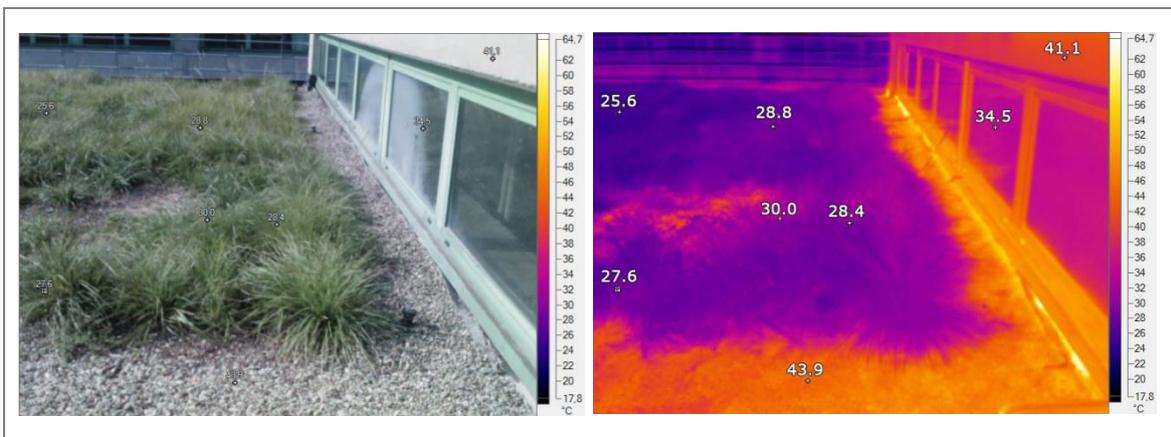


Figura 6.40: immagini del Native scattate con la termocamera alle 15:23:27 del 27/09/14 ed elaborate tramite il software SmartView.

42.2°C (Figura 6.40).

In tutte le immagini termografiche, comunque, il Native risulta essere la tipologia di copertura più fresca, differenziandosi dal Sedum per almeno 5°C.

6.3.2.4 Il mese di Ottobre

Si riportano i box-plot relativi al mese di Ottobre in cui le sonde del mini-registratore FT-90 erano disposte sulla guaina bituminosa (Figura 6.41) ed in corrispondenza del tetto verde coltivato a *Sedum* all'interno del substrato, indicativamente a -10 cm di profondità (Figura 6.42).

Si può notare come le temperature del Reference si siano mantenute con valori massimi mediamente attorno ai 40°C e con valori minimi mediamente di circa 13°C, così come avveniva nel mese precedente. Per quanto concerne il Green Roof, invece, i valori massimi di temperatura si sono aggirati attorno ai 21°C e quelli minimi attorno ai 16°C.

Durante il mese considerato, nel GR si verifica un'escursione termica giornaliera media pari a 4.64°C, mentre sul RR essa equivale a 27.15°C, quindi ben 22.51°C maggiore. Con la diminuzione delle temperature ambientali dovuta all'avvicinarsi dell'inverno si nota come la differenza nelle prestazioni termiche del tetto verde e della guaina bituminosa si attenui, ma rimanga pur sempre molto evidente.

Dal 7 Ottobre in poi si dispone anche delle temperature registrate dalle termocoppie.

Nella prima settimana di misurazioni (7-14 Ottobre) le otto termocoppie erano posizionate sul GR e sul RR, su due aste tarate, all'altezza di 0, 10, 20 e 30 cm dalla copertura. Nello specifico la termocoppia a livello 0 del Green Roof è stata posta in corrispondenza delle pietre laviche che compongono il substrato.

In prima battuta si sono realizzati dei box-plot per studiare le variazioni termiche relative ad ogni quota nell'arco della settimana per i due tetti (Figura 6.43 - Figura 6.44). Dal grafico riferito al Reference si può notare come i gradienti di temperatura maggiori si registrino alla quota 0, ossia a livello della guaina. Per le tre altezze superiori, invece, la temperatura presenta una variabilità quasi costante, pari a circa 15°C. Anche il Sedum alle stesse quote presenta un'escursione del medesimo valore; a differenza della copertura convenzionale, però, il Green Roof a livello col terreno dimostra un gradiente termico inferiore (23.67°C contro 43.83°C).

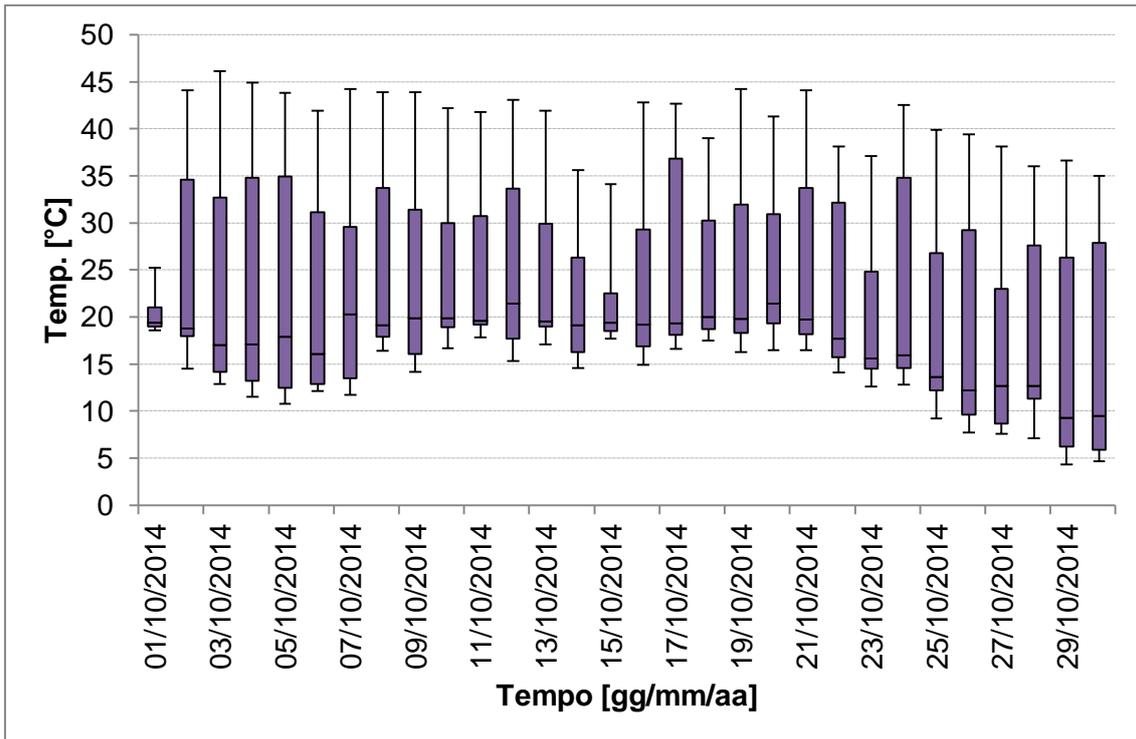


Figura 6.41: box-plot relativi alle temperature del RR registrate durante il mese di Ottobre dall'FT-90. Nel grafico sono indicati i valori massimi e minimi giornalieri rappresentati tramite segmenti, il venticinquesimo percentile, la mediana ed il settantacinquesimo percentile nella parte piena rettangolare.

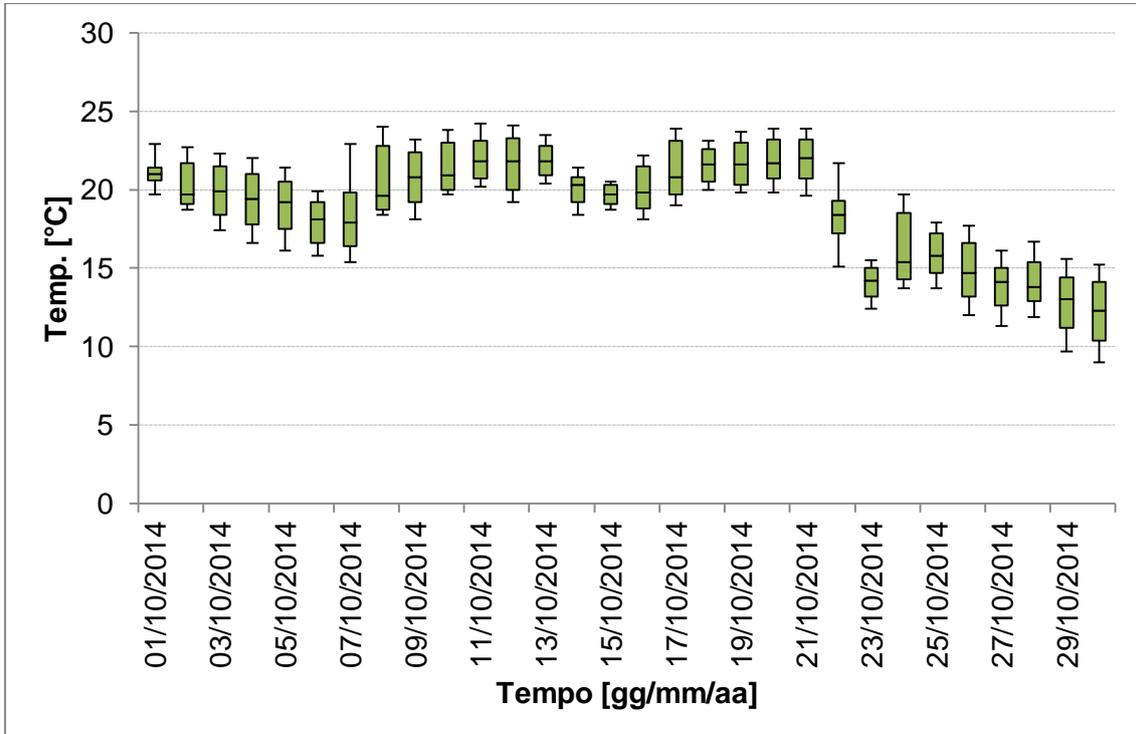


Figura 6.42: box-plot relativi alle temperature del GR registrate durante il mese di Ottobre dall'FT-90. Nel grafico sono indicati i valori massimi e minimi giornalieri rappresentati tramite segmenti, il venticinquesimo percentile, la mediana ed il settantacinquesimo percentile nella parte piena rettangolare.

Si è poi tracciato l'andamento medio orario delle temperature per entrambe le coperture in esame con lo scopo di evidenziare i gradienti orari (Figura 6.45 - Figura 6.46).

Come già s'intuiva già dai box-plot, per quanto concerne il Reference le maggiori variazioni si notano a diretto contatto con la guaina. Se di notte essa si raffredda raggiungendo valori di circa 15°C, durante le ore centrali si registrano temperature anche di 46°C. Già a 10 cm dalla guaina, però, il calore viene ampiamente dissipato, presentando i valori massimi attorno ai 26°C.

Nel grafico concernente il Sedum è invece possibile notare l'escursione termica a livello del terreno. Questo comportamento è falsato dal posizionamento della termocoppia rispettiva, che si ricorda essere in corrispondenza delle pietre che compongono il substrato e non delle piante grasse. Preso atto di questo, dalla settimana successiva la termocoppia è stata postata nei pressi della vegetazione. Nonostante la pietra lavica, alla quota di 30 cm è possibile apprezzare un raffrescamento dell'aria medio giornaliero di 1.42°C rispetto alla temperatura del terreno.

Grazie alla presenza delle termocoppie, durante questa settimana è stato anche possibile confrontare i valori di temperatura registrati dalla sonda FT-90 rispetto a quelli della termocoppia posizionata direttamente a contatto con il Reference Roof (Figura 6.47). Si è sempre sospettata una sovrastima delle temperature da parte della prima (confermata dall'impiego della termocamera nel mese di Settembre) e tramite questa comparazione se ne ha avuta conferma. Nello specifico la sonda sovrastima le temperature diurne massime di circa 8°C, mentre sottostima quelle notturne di circa 2.5°C. Difatti la sonda non ha mai subito una calibrazione, cosa che invece è avvenuta per le termocoppie.

Inoltre tramite un confronto tra le temperature registrate dalle termocoppie posizionate alla quota inferiore sul GR e sul RR (Figura 6.48) è possibile notare come sia il Sedum che la guaina risultino più caldi rispetto alla temperatura ambiente durante le ore diurne e poco più freddi la notte.

Come anticipato, questo comportamento risulterà diverso una volta spostata la termocoppia a livello 0 del Green Roof in prossimità di un cespuglietto di Sedum. Tale cambiamento è stato effettuato in data 16 Ottobre, quando anche le quattro termocoppie che si trovavano sul RR sono state spostate sul Native. Lo stesso giorno il

tappeto autoctono è stato potato ad un'altezza di circa 10 cm, dopo averne raggiunto circa 60 al termine dell'estate.

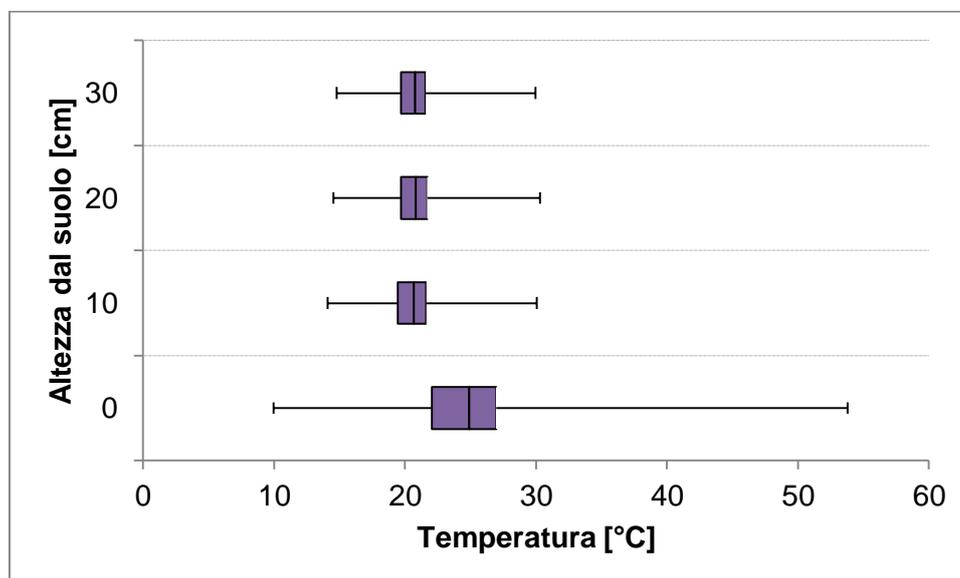


Figura 6.43: box-plot relativi alle temperature del RR registrate durante la settimana tra il 7 e il 14 Ottobre in funzione dell'altezza dal suolo. Nel grafico sono indicati i valori massimi e minimi settimanali per ogni quota tramite barre d'errore, il venticinquesimo percentile, la mediana ed il settantacinquesimo percentile nella parte piena rettangolare.

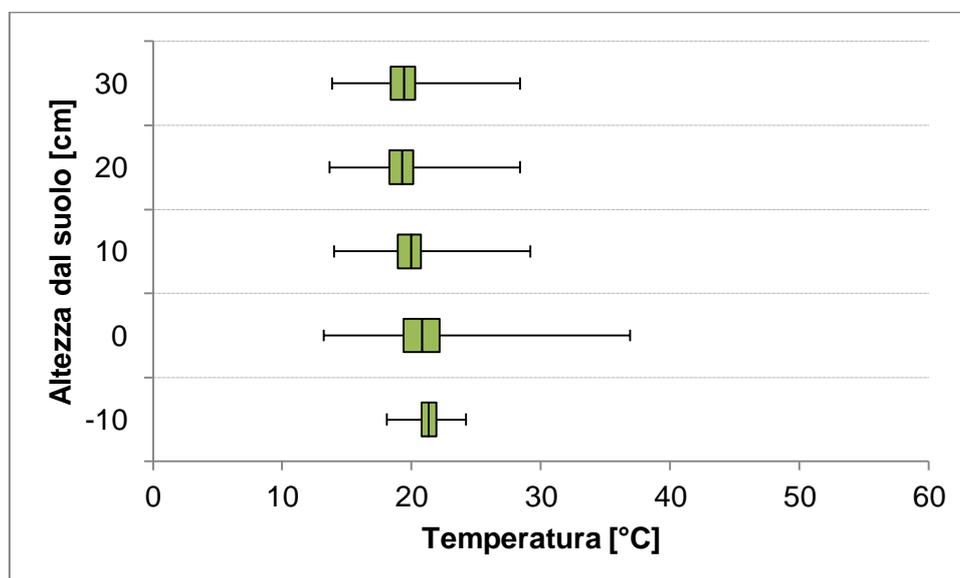


Figura 6.44: box-plot relativi alle temperature del GR registrate durante la settimana tra il 7 e il 14 Ottobre in funzione dell'altezza dal suolo. Nel grafico sono indicati i valori massimi e minimi settimanali per ogni quota tramite barre d'errore, il venticinquesimo percentile, la mediana ed il settantacinquesimo percentile nella parte piena rettangolare.

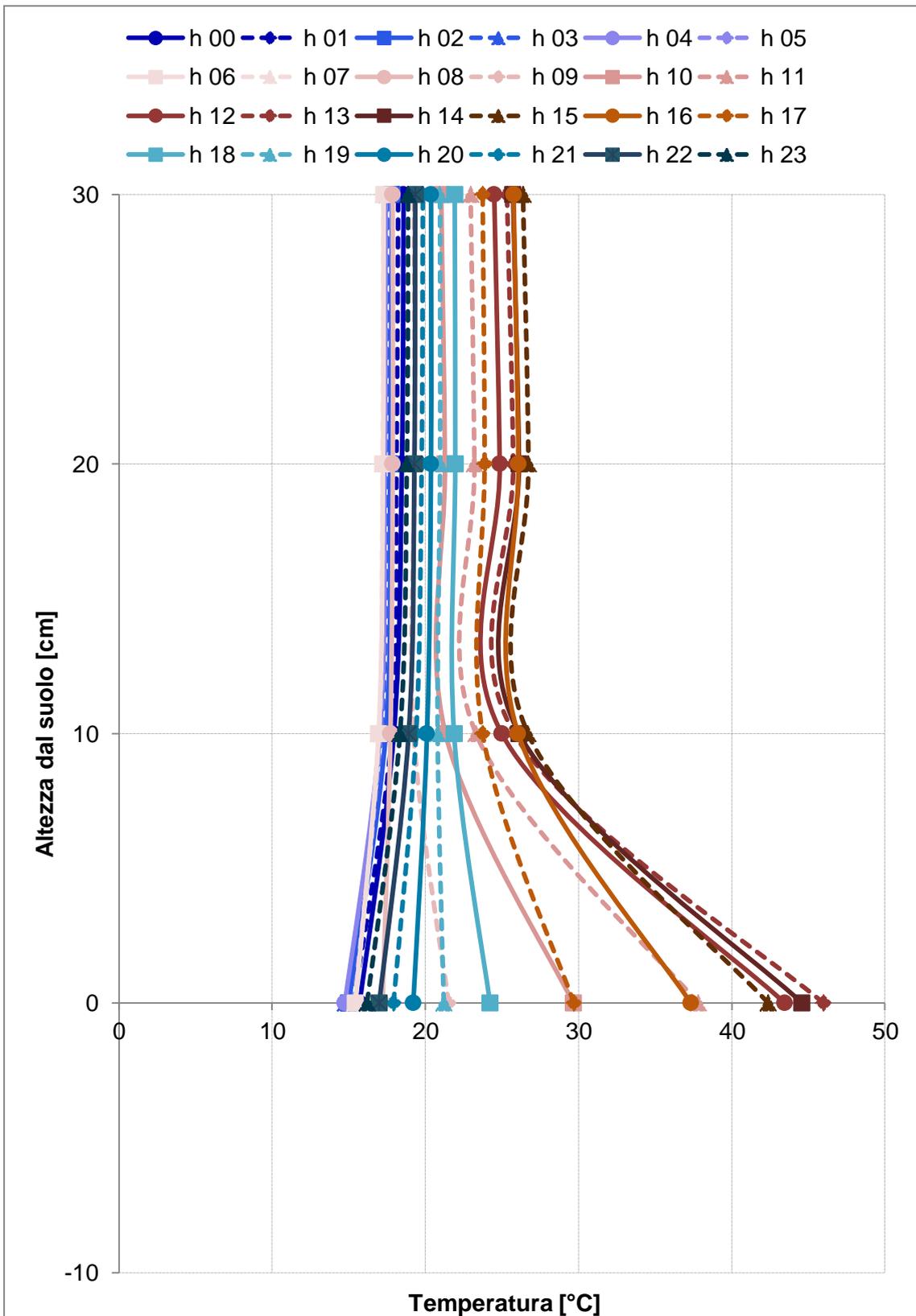


Figura 6.45: andamento medio orario delle temperature registrate dalle termocoppie poste a 0, 10, 20 e 30 cm in merito alla copertura convenzionale a guaina bituminosa (RR), in funzione dell'altezza dal suolo, nella settimana tra il 7 ed il 14 Ottobre.

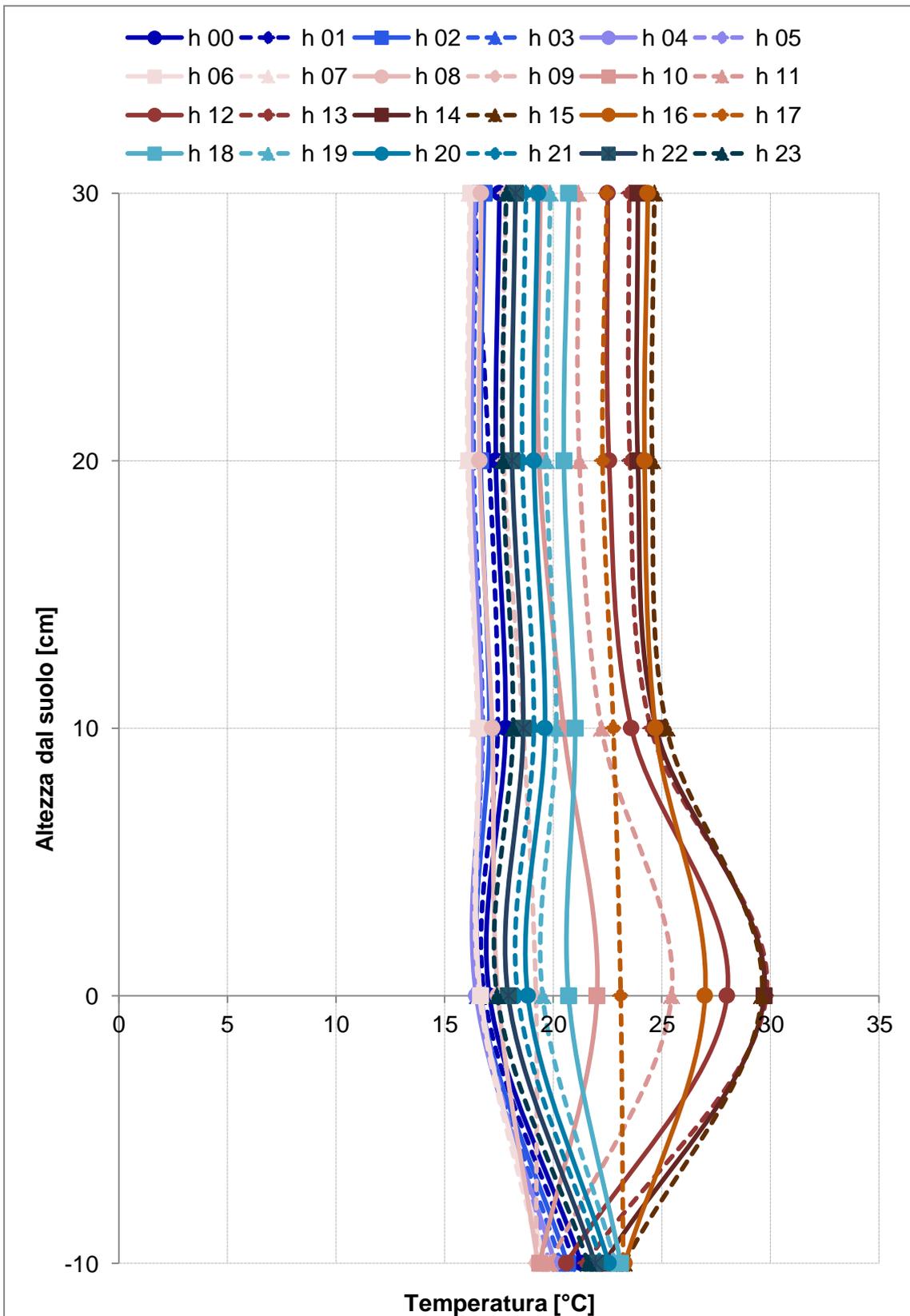


Figura 6.46: andamento medio orario delle temperature registrate dalle termocoppie poste a 0, 10, 20 e 30 cm e dalla sonda FT-90 posta a -10 cm in merito alla copertura a Sedum (GR), in funzione dell'altezza dal suolo, nella settimana tra il 7 ed il 14 Ottobre.

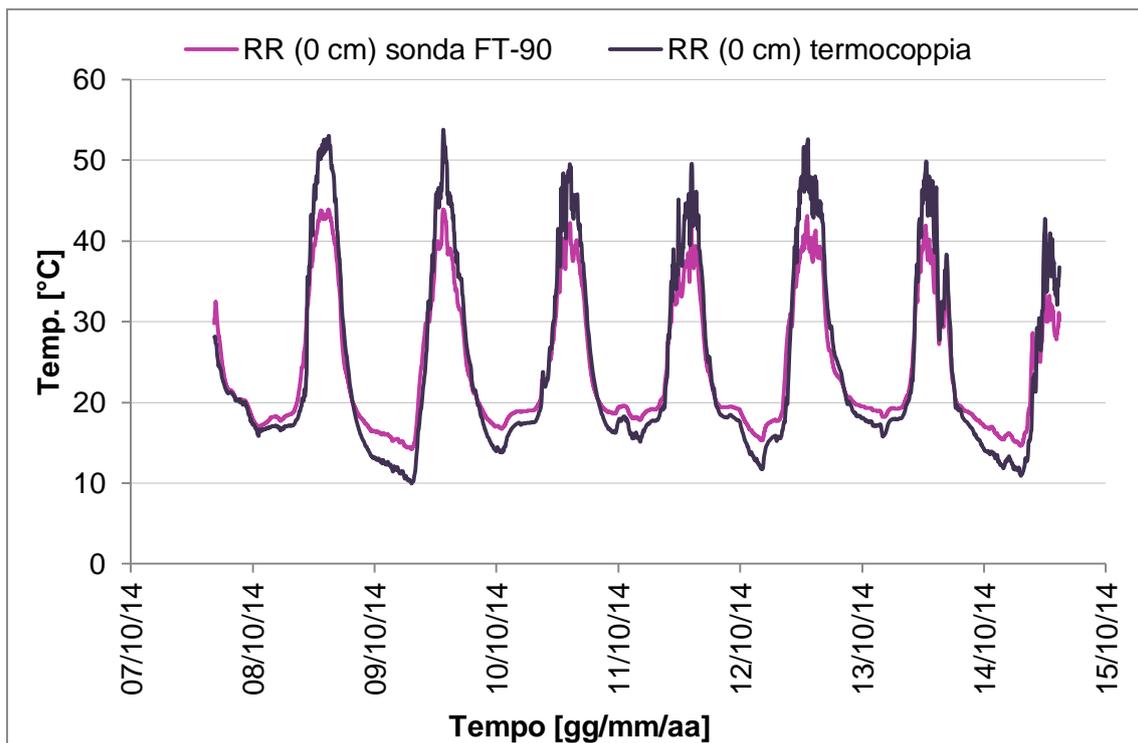


Figura 6.47: confronto tra le temperature registrate dalla sonda FT-90 e la termocoppia posizionata a livello 0 sulla guaina bituminosa del Reference Roof.

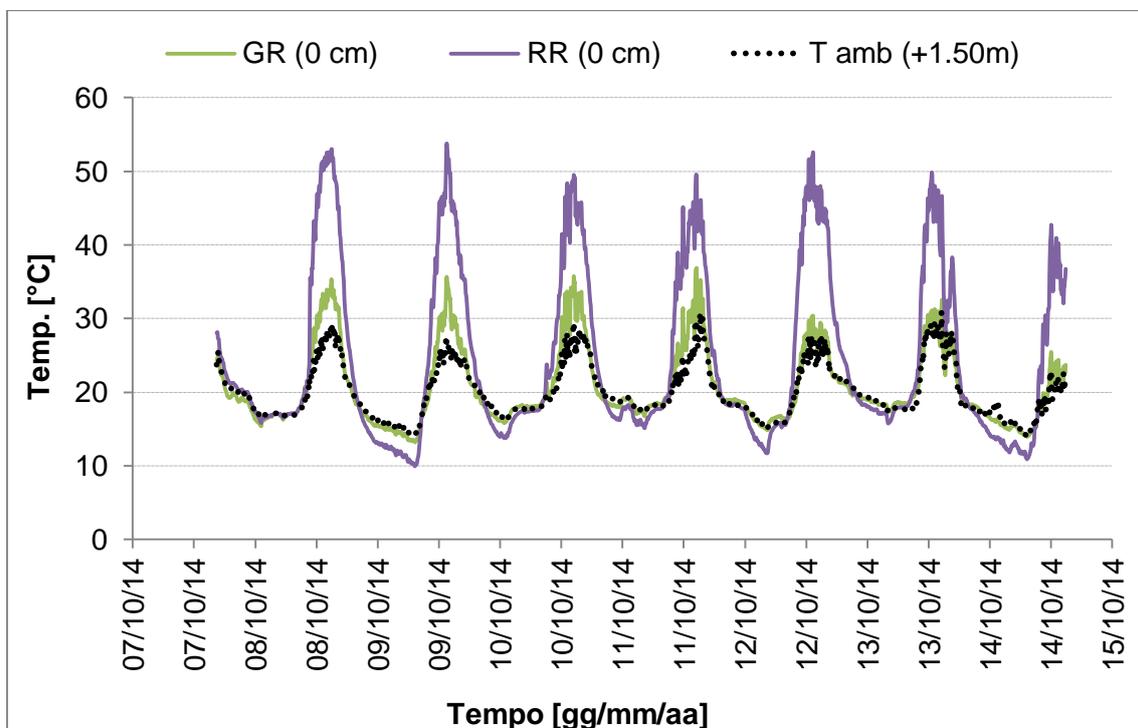


Figura 6.48: temperature registrate dalle termocoppie in corrispondenza del suolo sul Green e sul Reference Roof, messe a confronto con quella ambientale nella settimana tra il 7 ed il 14 Ottobre.

Come anticipato, dal 16 Ottobre in poi la temperatura superficiale del Sedum risulta inferiore a quella ambientale.

Se il Green Roof a livello del terreno risulta più fresco del Native (Figura 6.49), a 10 cm dalla superficie tale andamento si inverte ed è infatti il verde autoctono a mostrare una temperatura inferiore (Figura 6.50). Questo comportamento rimane invariato anche confrontando le termocoppie poste a 20 e 30 cm dal suolo (Figura 6.51 - 6.52).

Comportamenti non dissimili si riscontrano tra il 22 ed il 29 Ottobre, giorni durante i quali le termocoppie si trovano ancora a 0, 10, 20 e 30 cm rispetto al substrato del Green Roof e del Native.

In Figura 6.53 - 6.54 viene riportato l'andamento settimanale delle temperature registrate dalle termocoppie tramite box-plot. Per il tetto a Sedum si affiancano a questi valori quelli scaricati dalla sonda FT-90 in merito al substrato (-10 cm).

Le barre d'errore che individuano il primo ed il terzo quartile sono molto estese, evidenziando il range di variabilità delle misurazioni (fino a 25°C per la quota 0 del GR e quasi 30° per la quota +10 cm del Native). Tra tutte le quote considerate, quella per cui si registra la minor variabilità dei dati è chiaramente quella a -10 cm, vista l'inerzia

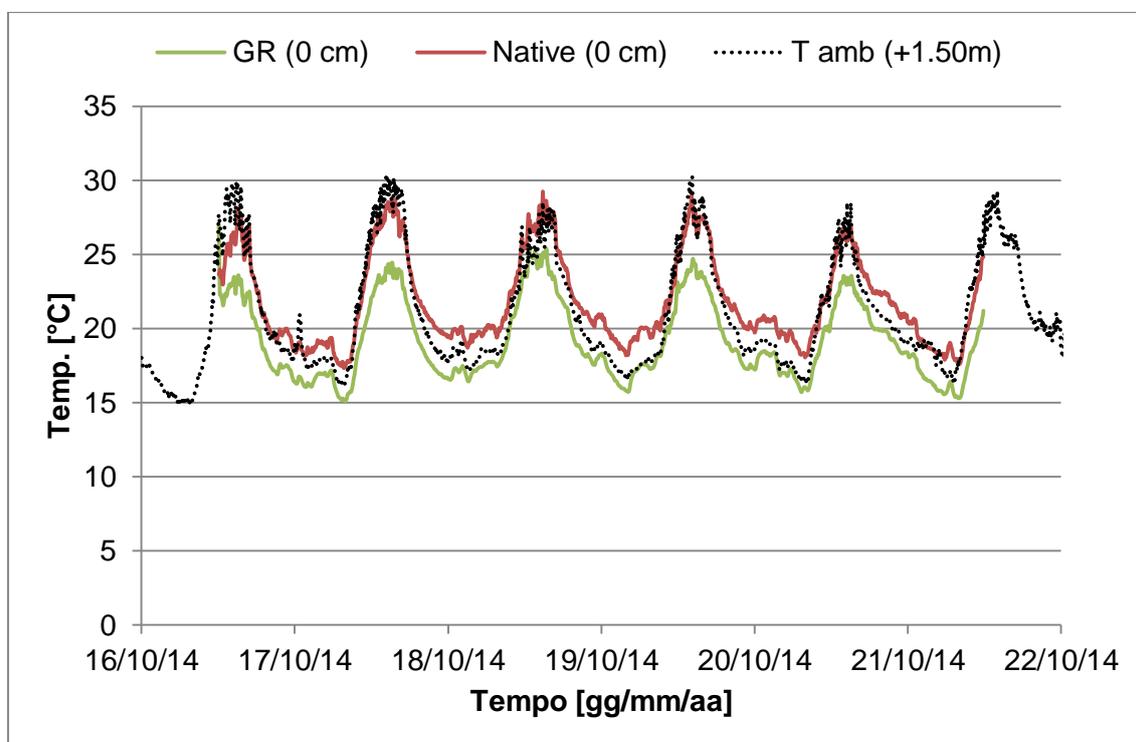


Figura 6.49: andamento delle temperature registrate dalle termocoppie in corrispondenza del Green Roof e del Native a contatto col terreno, in rapporto a quello della temperatura ambientale nei giorni tra il 16 ed il 21 Ottobre.

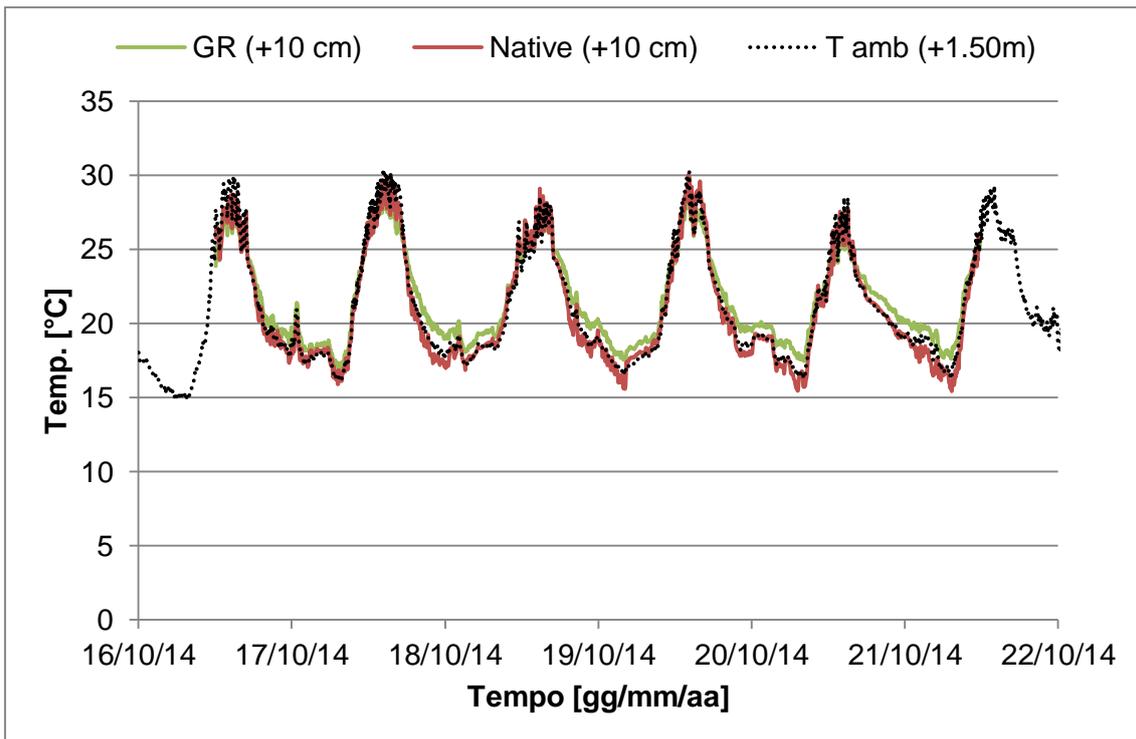


Figura 6.50: andamento delle temperature registrate dalle termocoppie in corrispondenza del Green Roof e del Native a 10 cm dal terreno, in rapporto a quello della temperatura ambientale nei giorni tra il 16 ed il 21 Ottobre.

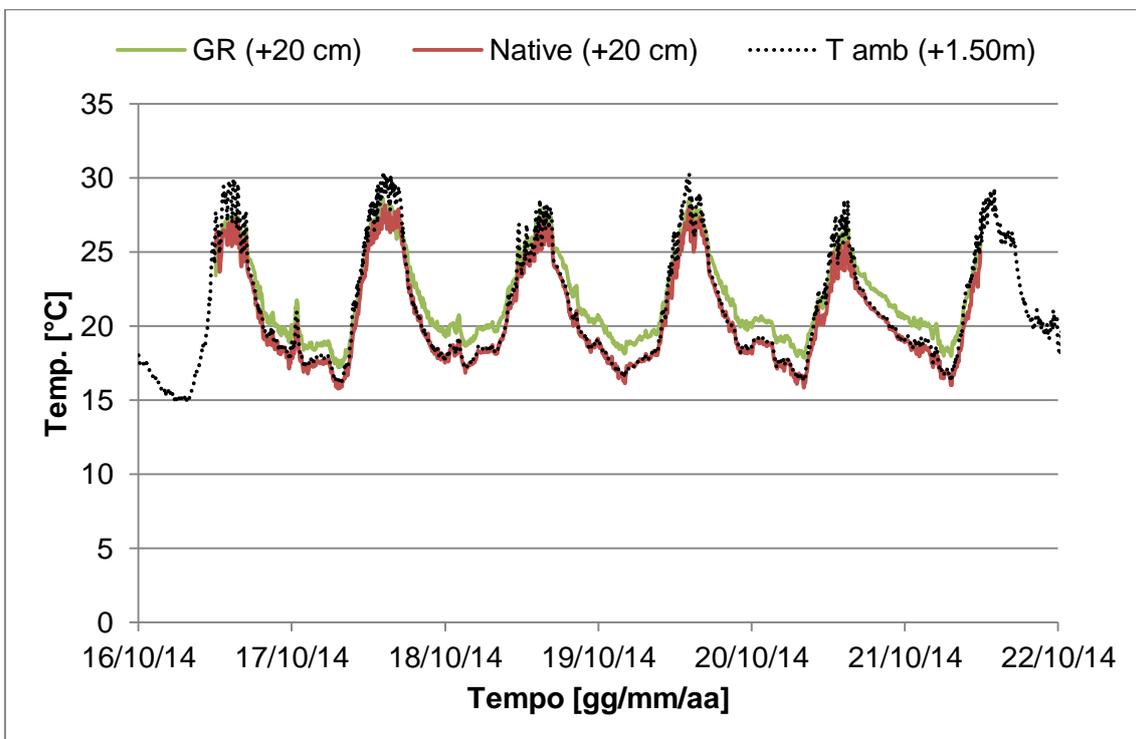


Figura 6.51: andamento delle temperature registrate dalle termocoppie in corrispondenza del Green Roof e del Native a 20 cm dal terreno, in rapporto a quello della temperatura ambientale nei giorni tra il 16 ed il 21 Ottobre.

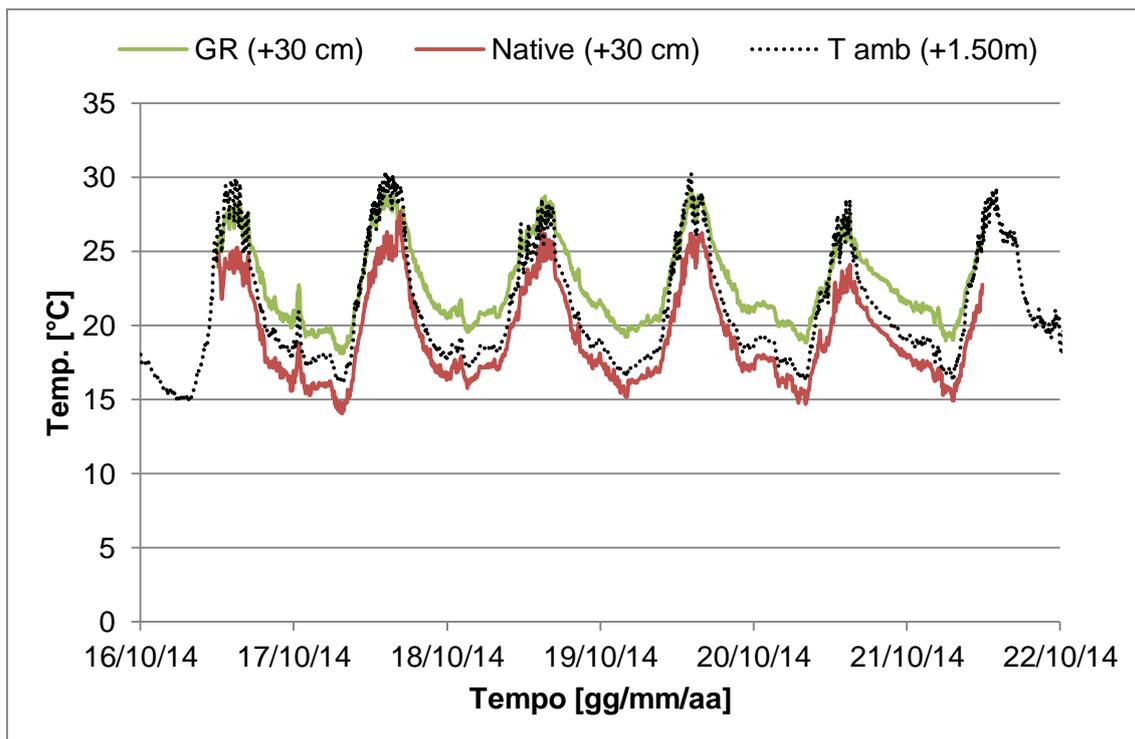


Figura 6.52: andamento delle temperature registrate dalle termocoppie in corrispondenza del Green Roof e del Native a 30 cm dal terreno, in rapporto a quello della temperatura ambientale nei giorni tra il 16 ed il 21 Ottobre.

termica del pacchetto.

Si è poi tracciato l'andamento medio orario delle temperature per entrambe le coperture verdi in quella settimana con lo scopo di evidenziare i gradienti orari (Figura 6.55 - Figura 6.56).

Infine, in Figura 6.57 - Figura 6.58 viene evidenziato l'effettivo comportamento orario delle temperature registrate dalle termocoppie in corrispondenza del Green e del Native Roof per il 24 Ottobre.

Concentrandosi in primo luogo sul Sedum, si nota come il valore termico riferito alla superficie del terreno sia tendenzialmente inferiore rispetto a quello registrato all'interno dello stesso ad una profondità di 10 cm, fatta eccezione per le ore centrali del giorno (dalle 10 alle 16). Questo mette in luce le caratteristiche d'inerzia termica del substrato tali per cui sono necessarie circa 5 ore dal sorgere del sole affinché esso si riscaldi.

Inoltre si noti come il profilo termico tende a scaldarsi con l'aumentare della distanza dal suolo, finendo col registrare una differenza media giornaliera tra 30 e 0 cm di +6.30°C.

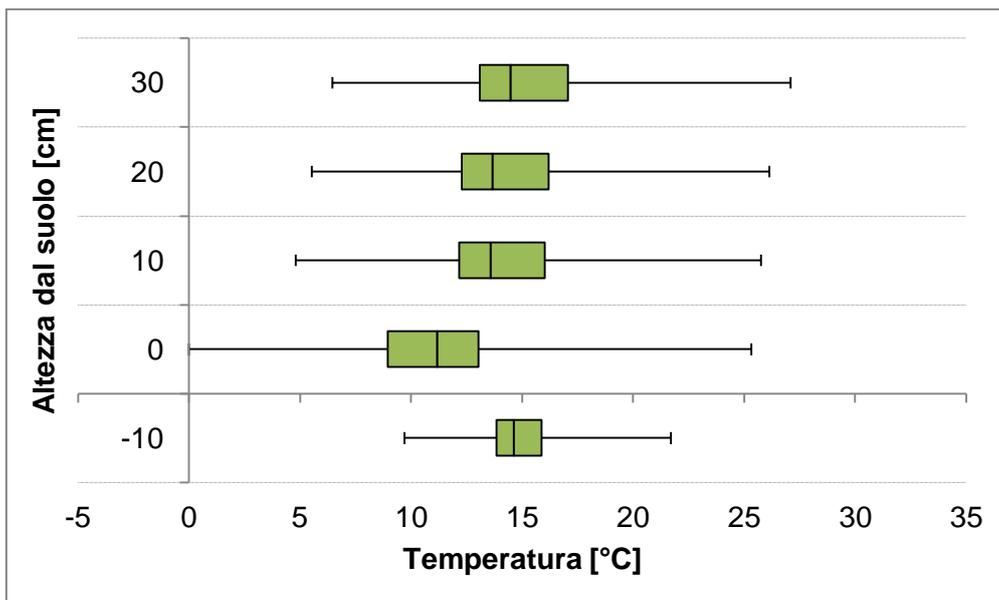


Figura 6.53: box-plot relativi alle temperature del GR registrate durante la settimana tra il 22 e il 29 Ottobre in funzione dell'altezza dal suolo. Nel grafico sono indicati i valori massimi e minimi settimanali per ogni quota tramite barre d'errore, il venticinquesimo percentile, la mediana ed il settantacinquesimo percentile nella parte piena rettangolare.

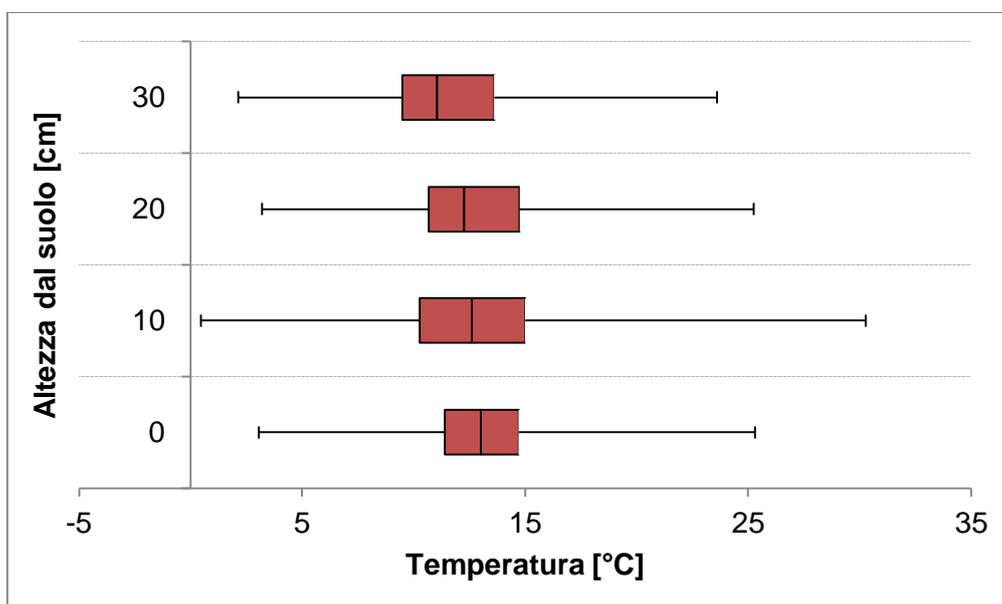


Figura 6.54: box-plot relativi alle temperature del Native registrate durante la settimana tra il 22 e il 29 Ottobre in funzione dell'altezza dal suolo. Nel grafico sono indicati i valori massimi e minimi settimanali per ogni quota tramite barre d'errore, il venticinquesimo percentile, la mediana ed il settantacinquesimo percentile nella parte piena rettangolare.

Il comportamento del Sedum a livello superficiale nelle ore più fresche (tra le 17 e le 6 del giorno successivo) è visibilmente diverso da quello che assume durante quelle centrali. Si pensa che la ragione di questo risieda nella tipologia di specie vegetale; difatti il Sedum appartiene ad un genere di piante xerofile a fotosintesi CAM (acronimo di *Crassulacean Acid Metabolism*, ossia metabolismo acido delle crassulacee), ovvero che mantiene gli stomi chiusi durante il giorno, facendo sì che non vi sia dispersione di acqua. La loro apertura durante la notte si riflette in una riduzione della temperatura e in un aumento dell'evapotraspirazione da parte della pianta. La fotosintesi CAM, pertanto, va intesa come una risorsa metabolica integrativa che consente il proseguimento dell'attività vegetativa anche in condizioni proibitive.

Il Native, dal canto suo, si rivela essere superficialmente più caldo del Green Roof, ma l'effetto rinfrescante a una distanza di 30 cm dal suolo risulta essere superiore rispetto al Sedum in media di 3.60°C, probabilmente a causa della lunghezza degli steli d'erba e dell'apertura diurna degli stomi che aumenta la capacità evapotraspirante delle piante. A differenza di ciò che accade in Figura 6.57, per il Native si registrano fluttuazioni orarie più evidenti così come un raffrescamento a 30 cm rispetto il suolo di circa 1°C. L'andamento ondulato del profilo è probabilmente dovuto all'instaurarsi di moti convettivi in corrispondenza di primi strati superficiali d'aria e all'altezza degli steli pari a circa 10-12 cm.

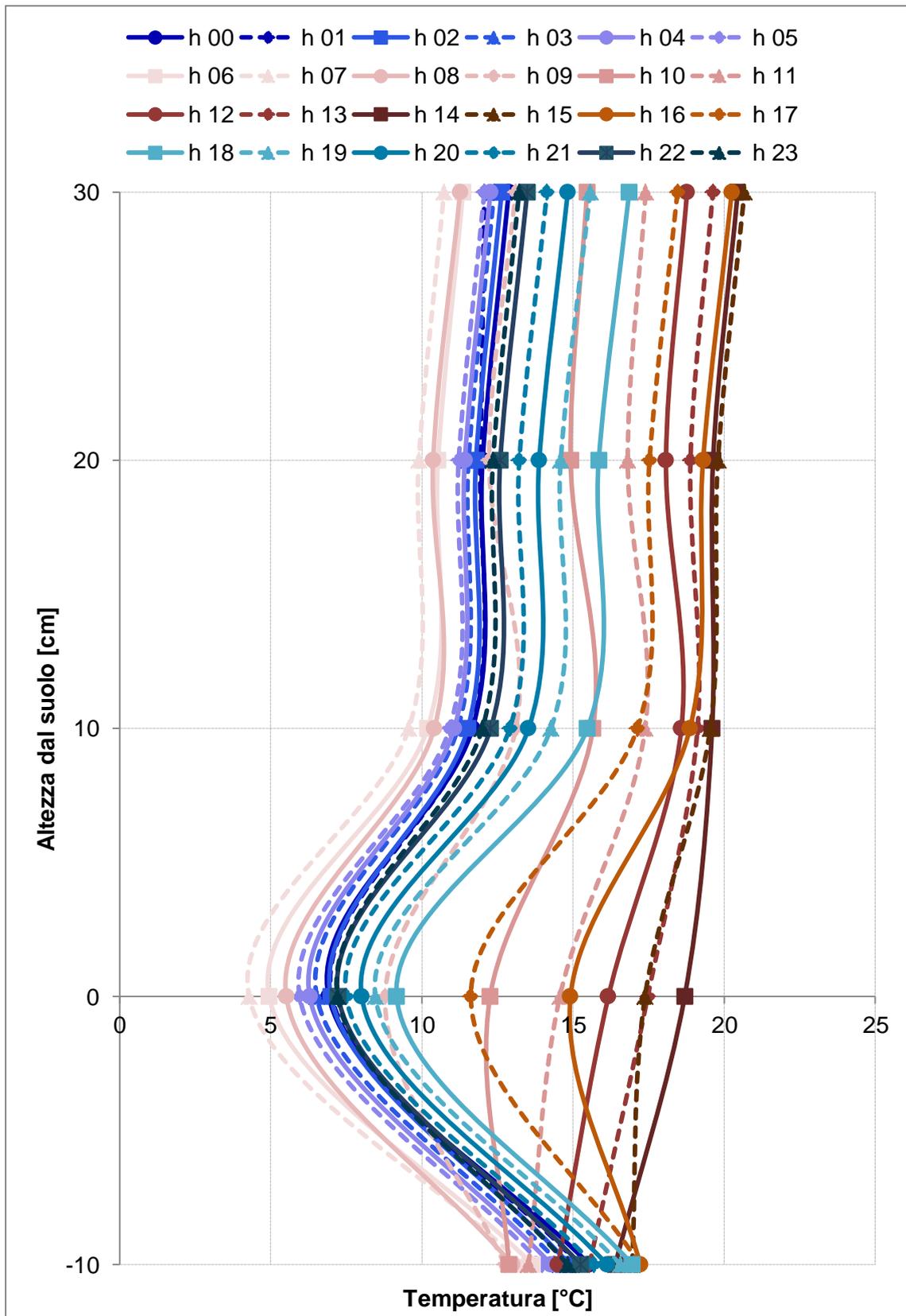


Figura 6.55: andamento medio orario delle temperature registrate dalle termocoppie poste a 0, 10, 20 e 30 cm e dalla sonda FT-90 posta a -10 cm in merito alla copertura a Sedum (GR), in funzione dell'altezza dal suolo, nella settimana tra il 22 ed il 29 Ottobre.

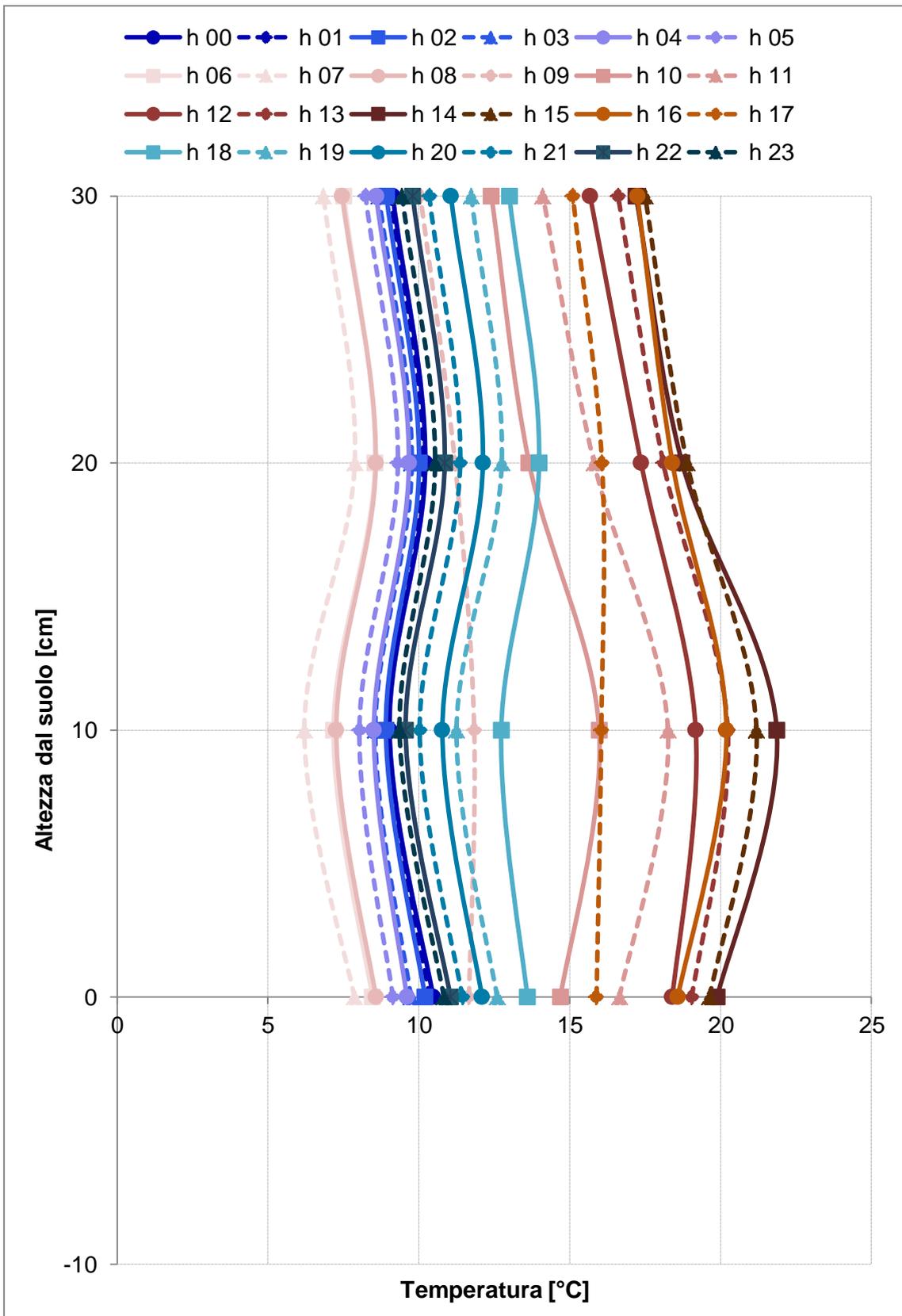


Figura 6.56: andamento medio orario delle temperature registrate dalle termocoppie poste a 0, 10, 20 e 30 cm in merito alla copertura autoctona (NA), in funzione dell'altezza dal suolo, nella settimana tra il 22 ed il 29 Ottobre.

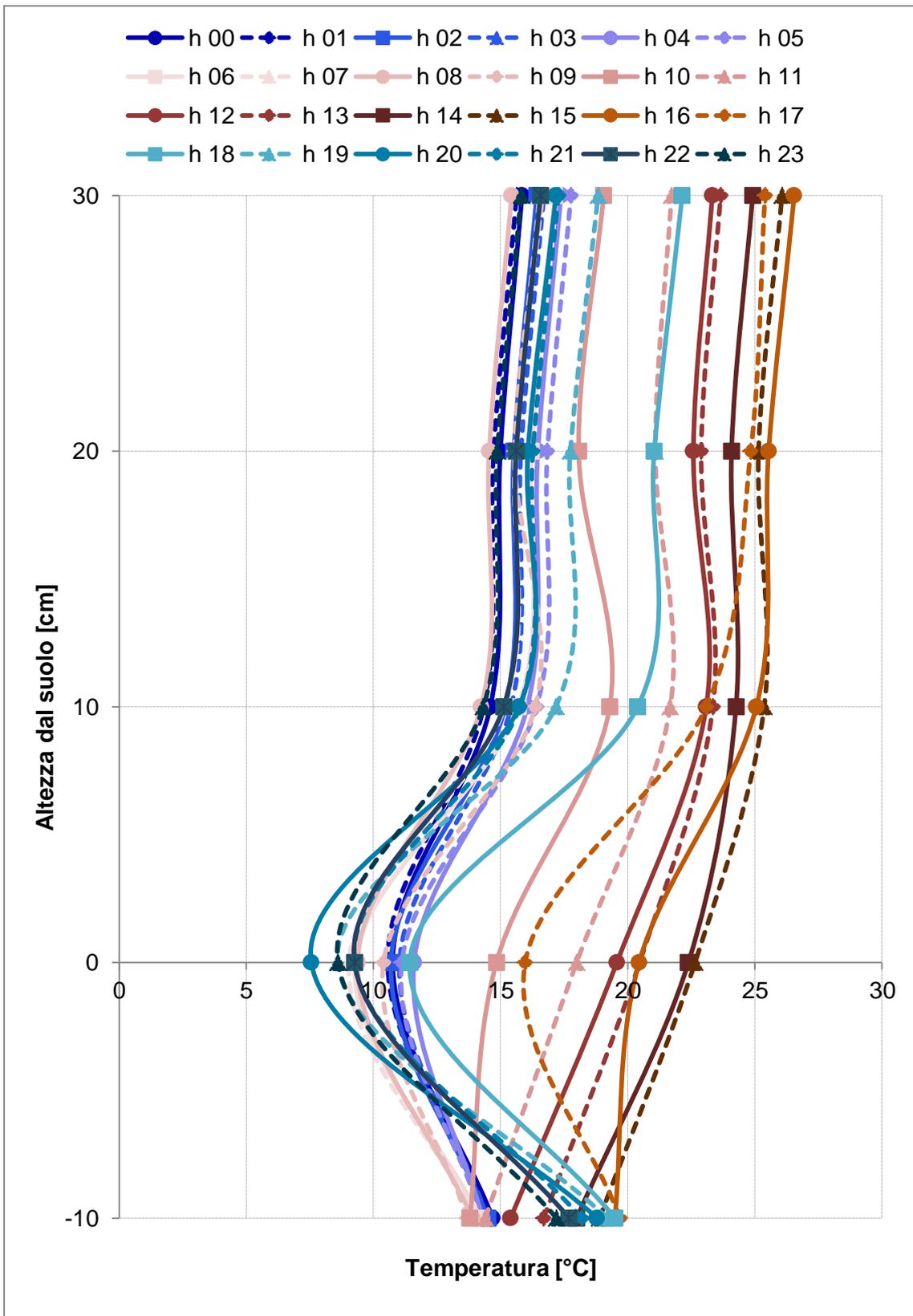


Figura 6.57: andamento orario delle temperature registrate dalle termocoppie poste a 0, 10, 20 e 30 cm e dalla sonda FT-90 posta a -10 cm in merito alla copertura a Sedum (GR), in funzione dell'altezza dal suolo, nella giornata del 24 Ottobre.

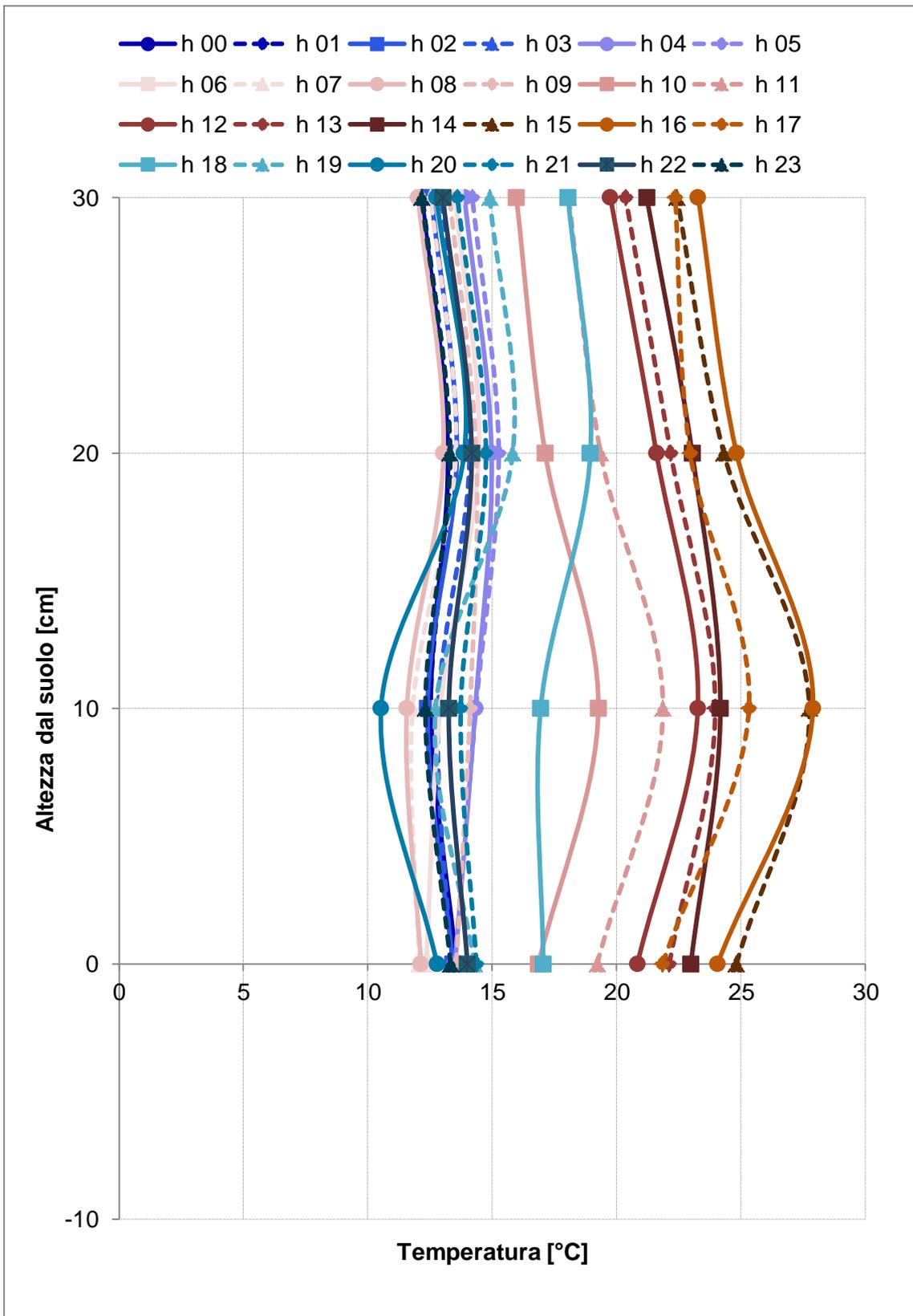


Figura 6.58: andamento orario delle temperature registrate dalle termocoppie poste a 0, 10, 20 e 30 cm in merito alla copertura autoctona (Native), in funzione dell'altezza dal suolo, nella giornata del 24 Ottobre.

6.3.2.5 Il mese di Novembre

Con il diminuire delle temperature stagionali e l'aumentare dell'umidità notturna, il funzionamento del pc cui sono connesse le termocoppie è stato più volte compromesso, pertanto per il mese di novembre si dispone dei loro dati solo tra i giorni 3-4, 18-21 e 28-30.

Se nel primo periodo la disposizione delle termocoppie è rimasta invariata rispetto all'ultimo scenario descritto, per gli altri due le termocoppie erano sempre situate sul GR e sul Native, ma sono state spostate all'altezza di 0, 10, 20 e 60 cm dal suolo per poter studiare più dettagliatamente a che quota si iniziassero a disperdere i benefici termici del verde.

A carattere esemplificativo si riportano nelle Figure Figura 6.56 – Figura 6.59 gli andamenti delle temperature registrati nel periodo centrale.

Come si evince da un confronto con le Figure Figura 6.49 – Figura 6.52, la temperatura ambientale è diminuita di una dozzina di gradi nell'arco di un mese. Di conseguenza anche tutte le termocoppie segnano temperature inferiori rispetto a quel periodo.

A differenza di quanto accadeva nel mese di Ottobre, il Native si mantiene più fresco del Sedum a livello superficiale nelle prime ore del mattino ed in quelle pomeridiane (Figura 6.59). A 20 e 30 cm, invece, esso si conferma a temperature inferiori durante tutto l'arco della giornata rispetto al GR, così come si era visto in Ottobre.

A 60 cm dal suolo, si registrano andamenti differenti a seconda del periodo esaminato. Per questo motivo verranno riportati e discussi sia i risultati registrati tra il 18 e il 21 Novembre che quelli tra il 28 e il 30.

Nel primo intervallo temporale il Native presenta temperature maggiori del Sedum durante le prime e le ultime ore del giorno (Figura 6.62); durante quelle centrali sono infatti le temperature del Sedum a prevalere, seppure di un grado. Nel periodo tra il 28 ed il 30, invece, il Native risulta più caldo di circa 0.5°C durante tutto l'arco della giornata (Figura 6.63), pertanto si ritiene necessaria la raccolta di maggiori dati durante il periodo invernale per un'analisi accurata del comportamento termico delle specie vegetali in questione a questa quota.

Si è inoltre indagato il comportamento termico del substrato a Sedum facendo riferimento alla sonda FT-90 posta al suo interno, in quanto a fine Ottobre è stato

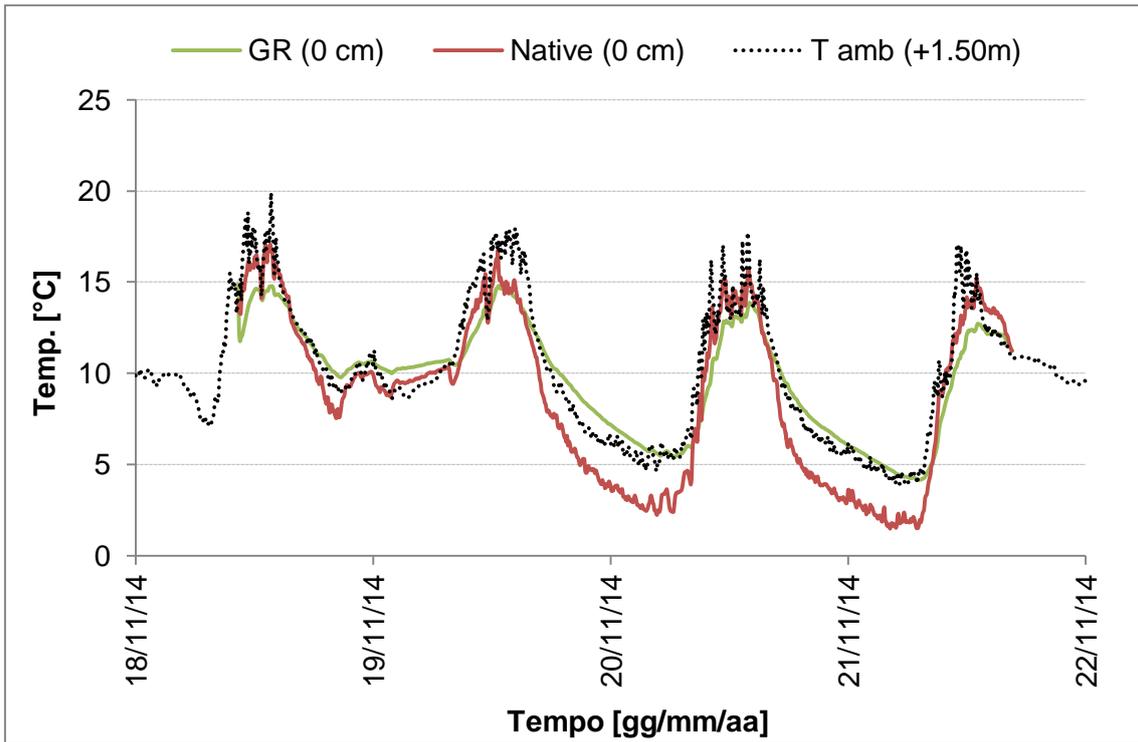


Figura 6.59: andamento delle temperature registrate dalle termocoppie in corrispondenza del Green Roof e del Native a contatto col terreno, in rapporto a quello della temperatura ambientale nei giorni tra il 18 ed il 21 Novembre.

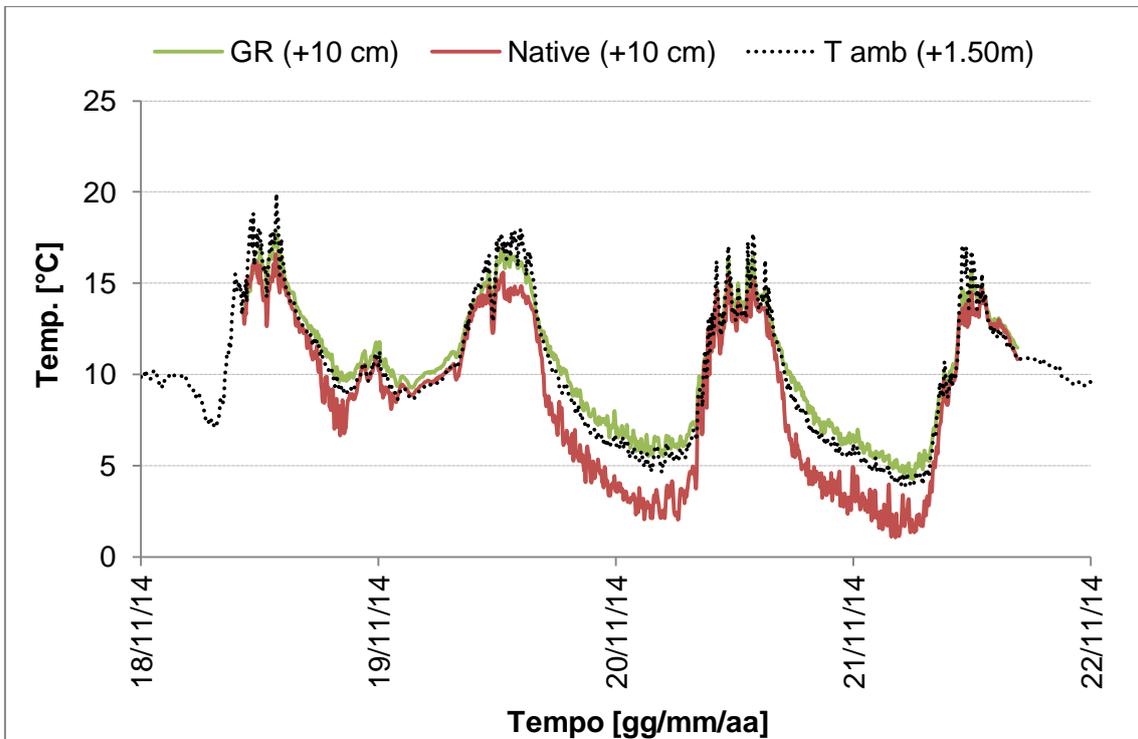


Figura 6.60: andamento delle temperature registrate dalle termocoppie in corrispondenza del Green Roof e del Native a 10 cm dal terreno, in rapporto a quello della temperatura ambientale nei giorni tra il 18 ed il 21 Novembre.

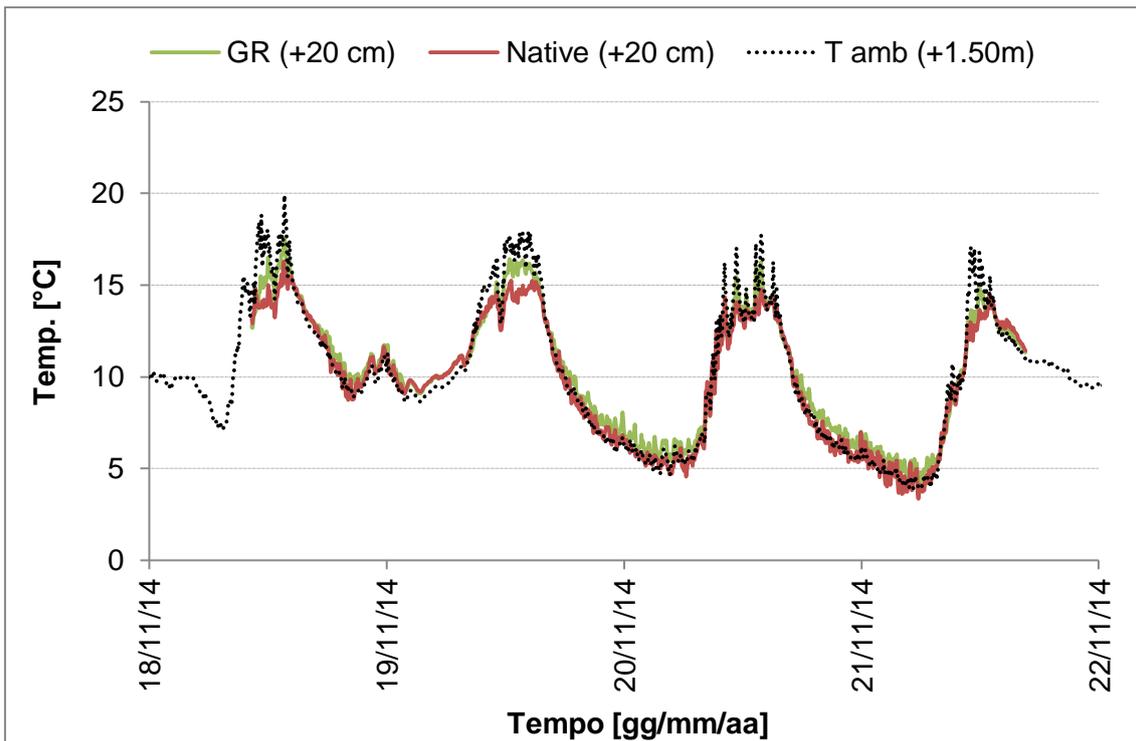


Figura 6.61: andamento delle temperature registrate dalle termocoppie in corrispondenza del Green Roof e del Native a 20 cm dal terreno, in rapporto a quello della temperatura ambientale nei giorni tra il 18 ed il 21 Novembre.

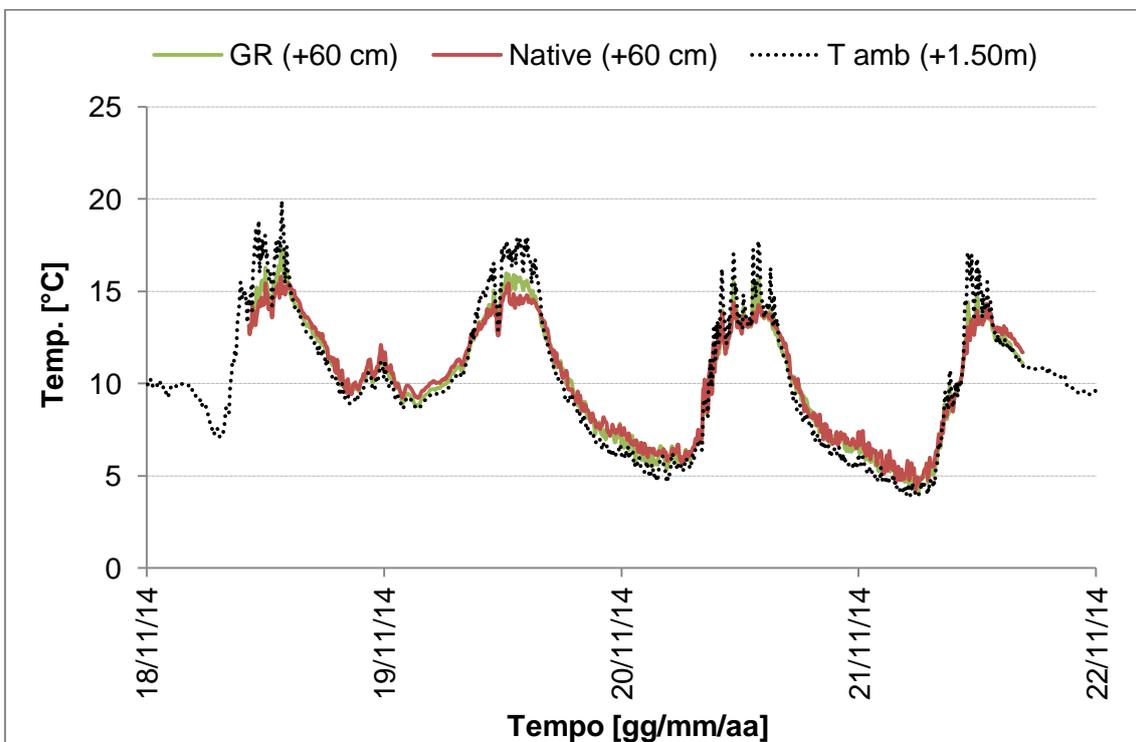


Figura 6.62: andamento delle temperature registrate dalle termocoppie in corrispondenza del Green Roof e del Native a 60 cm dal terreno, in rapporto a quello della temperatura ambientale nei giorni tra il 18 ed il 21 Novembre.

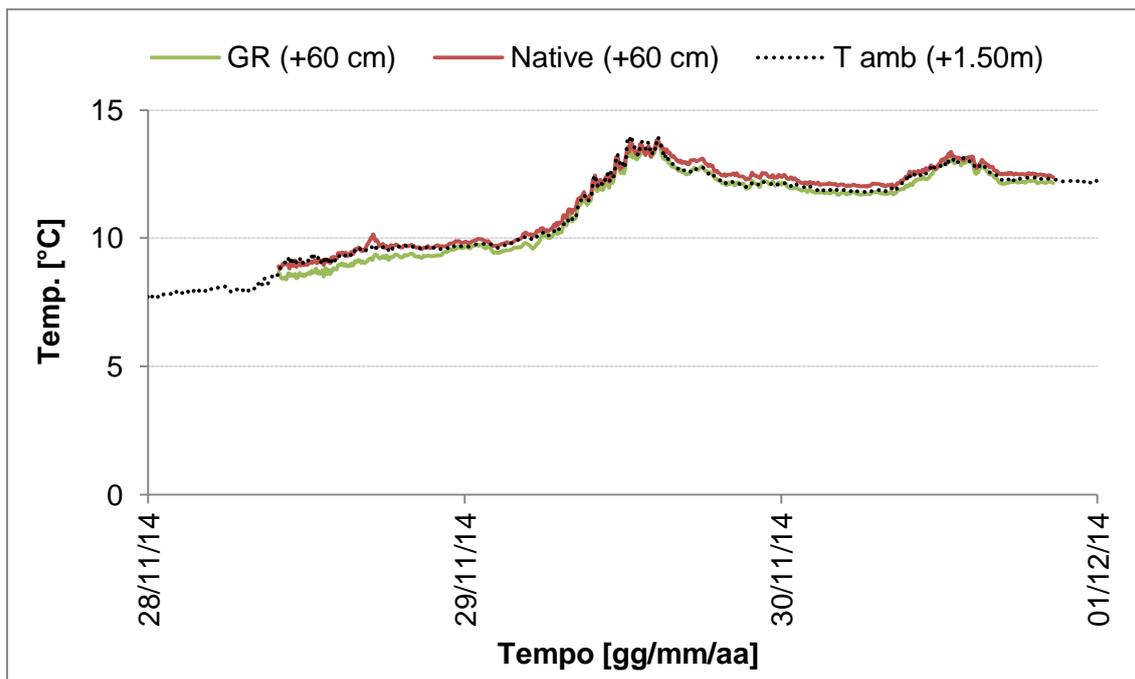


Figura 6.63: andamento delle temperature registrate dalle termocoppie in corrispondenza del Green Roof e del Native a 60 cm dal terreno, in rapporto a quello della temperatura ambientale nei giorni tra il 28 ed il 30 Novembre.

accesso l'impianto di riscaldamento nelle stanze sottostanti afferenti al LAGIRN (Figura 6.64).

Fino al 4 Novembre incluso, l'andamento delle temperature all'interno del substrato riflette quello della temperatura ambientale registrato dalla stazione Hobo.

Nei tre giorni successivi il loro comportamento varia notevolmente: il 5 Novembre infatti si verifica un evento di pioggia che si protrae per i due giorni successivi. In questo periodo la temperatura ambiente subisce un calo, che però non si riflette totalmente su quella a -10 cm vista le proprietà di inerzia termica del terreno.

Un andamento simile viene evidenziate anche durante l'evento di pioggia che ha inizio il 24 Novembre, per cui la temperatura del substrato del Green Roof si dimostra superiore rispetto a quella ambientale.

In Figura 6.65 si riporta invece uno zoom relativo al periodo tra il 18 ed il 21 Novembre di cui si dispone anche dei dati delle termocoppie.

In seguito si sono accorpati i dati riguardanti gli ultimi due periodi di misurazioni per tracciare l'andamento medio delle temperature registrate dalle termocoppie, trattandoli come se facessero parte di un'unica settimana (Figura 6.66 – 6.67). Come di consueto,

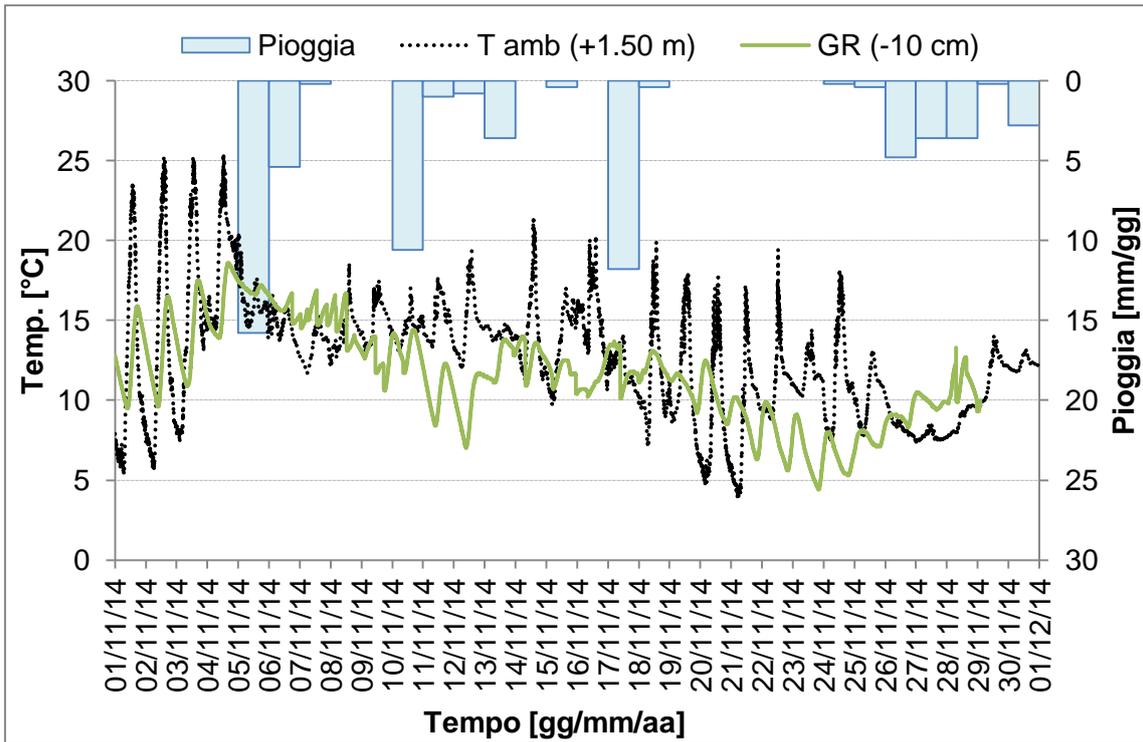


Figura 6.64: andamento delle temperature registrate dalla sonda FT-90 in corrispondenza del Green Roof a -10 cm di profondità nel terreno, in rapporto a quello della temperatura ambientale durante tutto il mese di Novembre

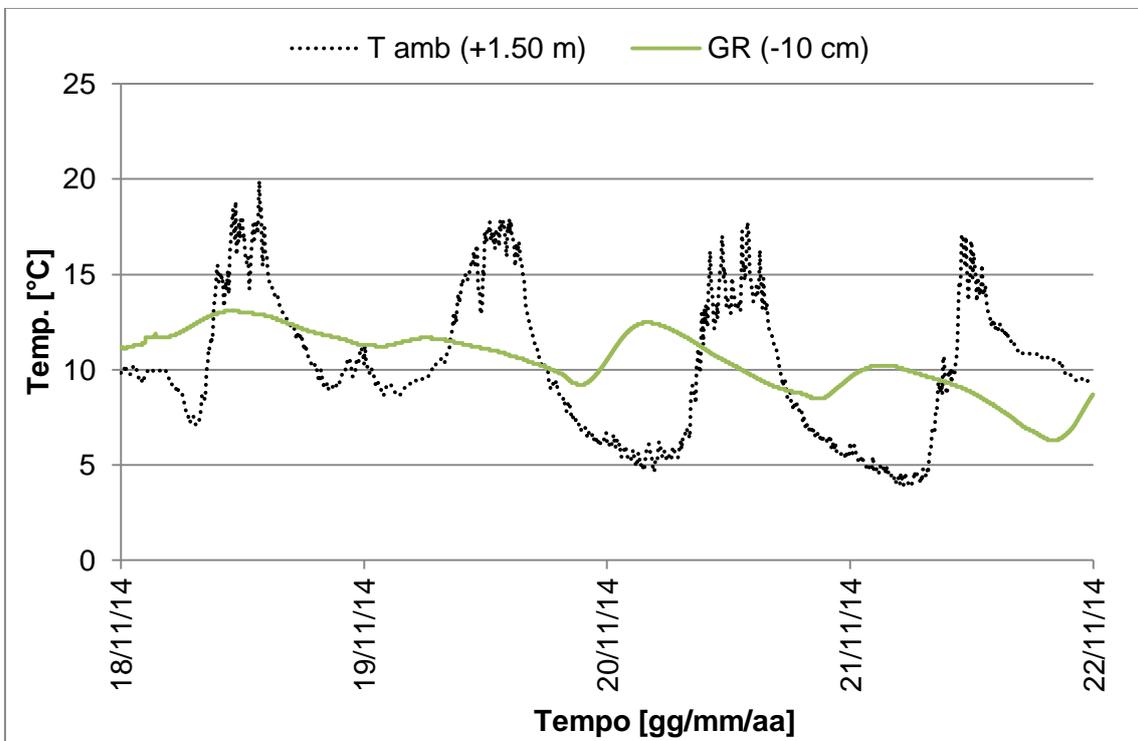


Figura 6.65: andamento delle temperature registrate dalla sonda FT-90 in corrispondenza del Green Roof a -10 cm di profondità nel terreno, in rapporto a quello della temperatura ambientale nei giorni tra il 18 ed il 21 Novembre

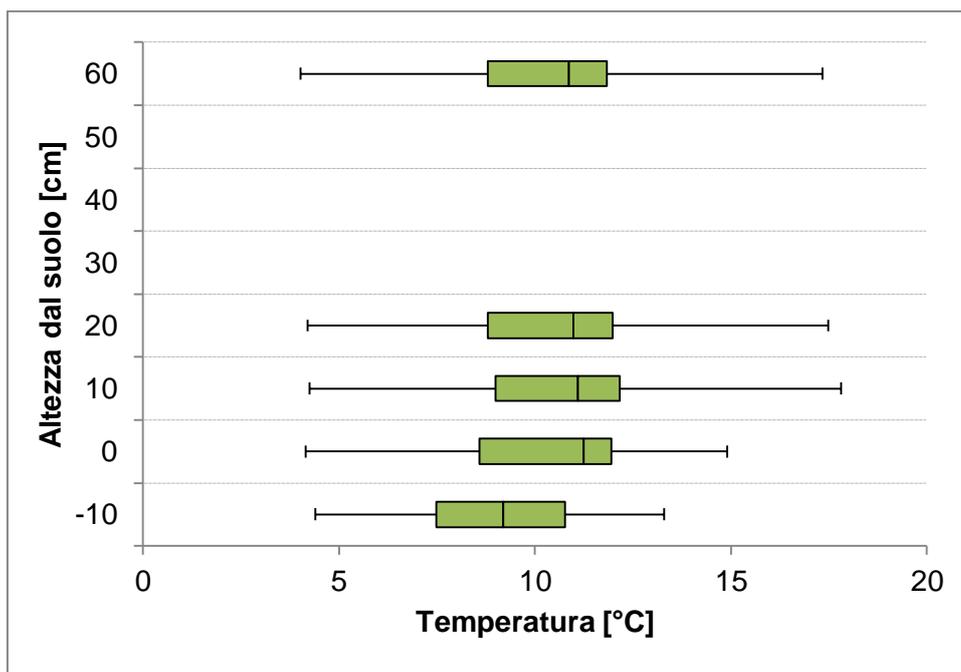


Figura 6.66: box-plot relativi alle temperature del GR registrate durante la settimana fittizia, frutto dell'accorpamento dei dati del 18-21 Novembre con quelli del 28-30, in funzione dell'altezza dal suolo. Nel grafico sono indicati i valori massimi e minimi settimanali per ogni quota tramite barre d'errore, il venticinquesimo percentile, la mediana ed il settantacinquesimo percentile nella parte piena rettangolare.

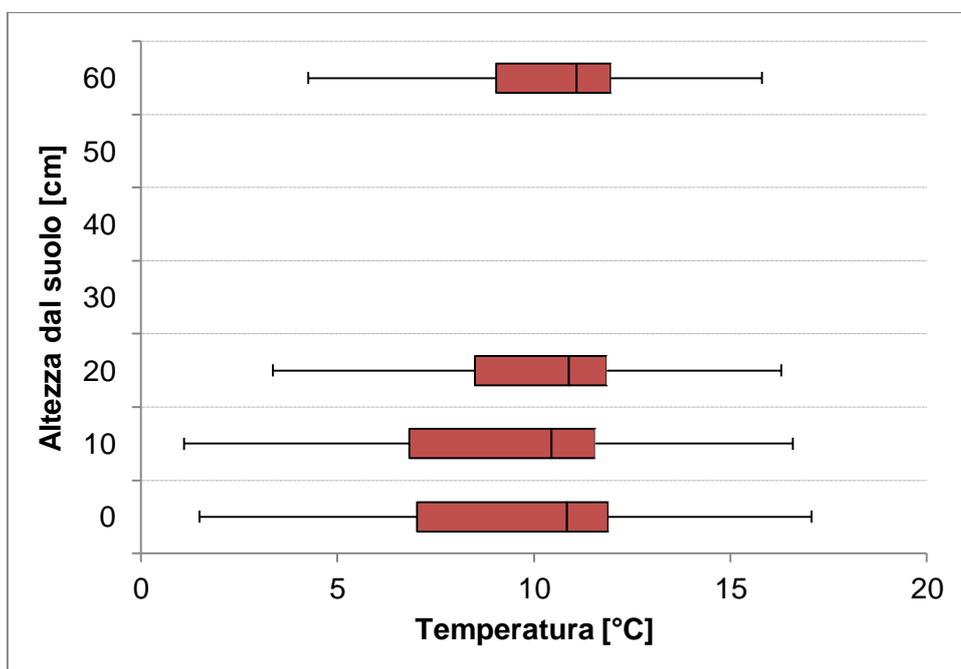


Figura 6.67: box-plot relativi alle temperature del Native registrate durante la settimana fittizia, frutto dell'accorpamento dei dati del 18-21 Novembre con quelli del 28-30, in funzione dell'altezza dal suolo. Nel grafico sono indicati i valori massimi e minimi settimanali per ogni quota tramite barre d'errore, il venticinquesimo percentile, la mediana ed il settantacinquesimo percentile nella parte piena rettangolare.

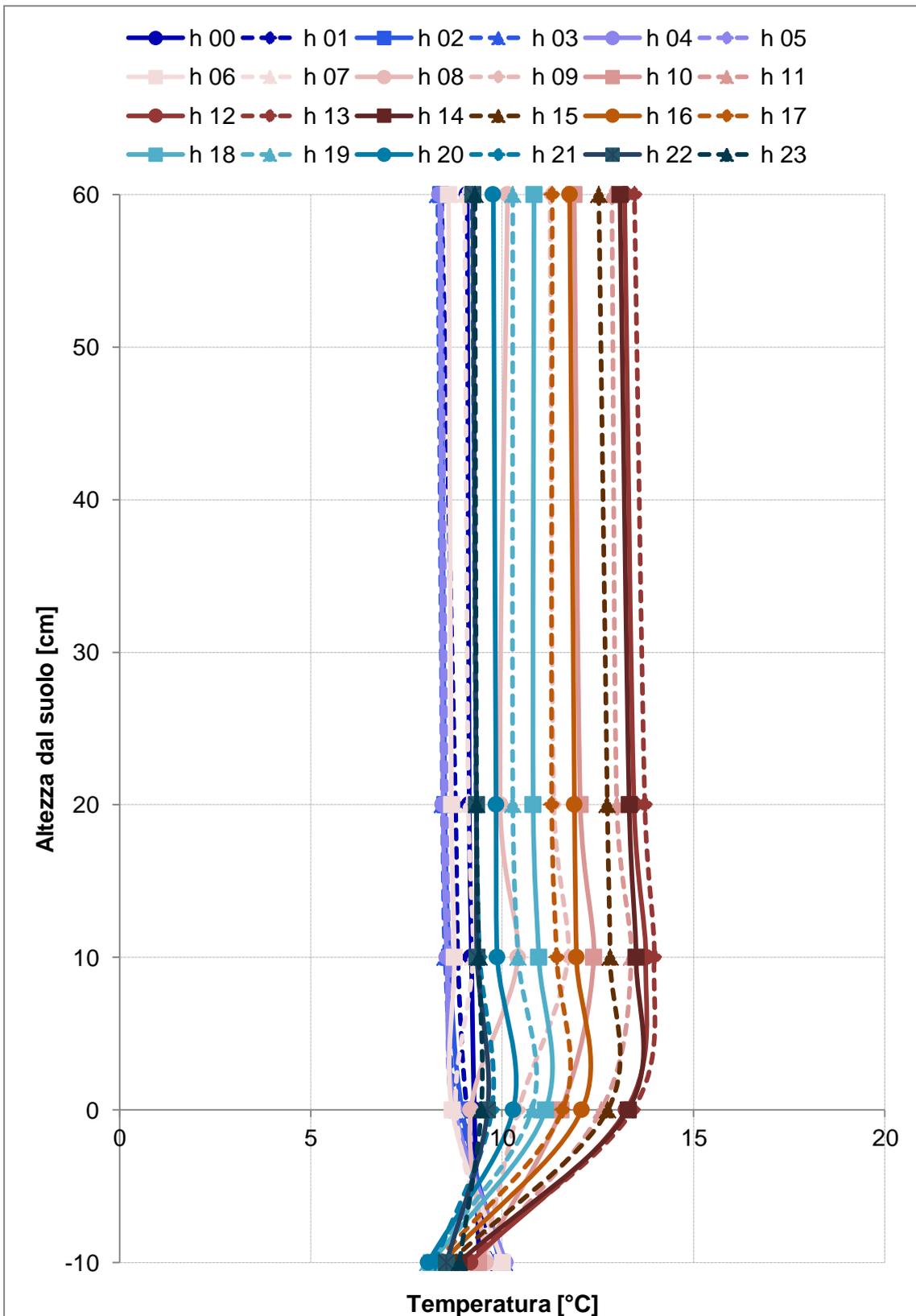


Figura 6.68: andamento medio orario delle temperature registrate dalle termocoppie poste a 0, 10, 20 e 60 cm e dalla sonda FT-90 posta a -10 cm in merito alla copertura a Sedum (GR), in funzione dell'altezza dal suolo, nella settimana fittizia frutto dell'accorpamento dei dati del 18-21 Novembre con quelli del 28-30

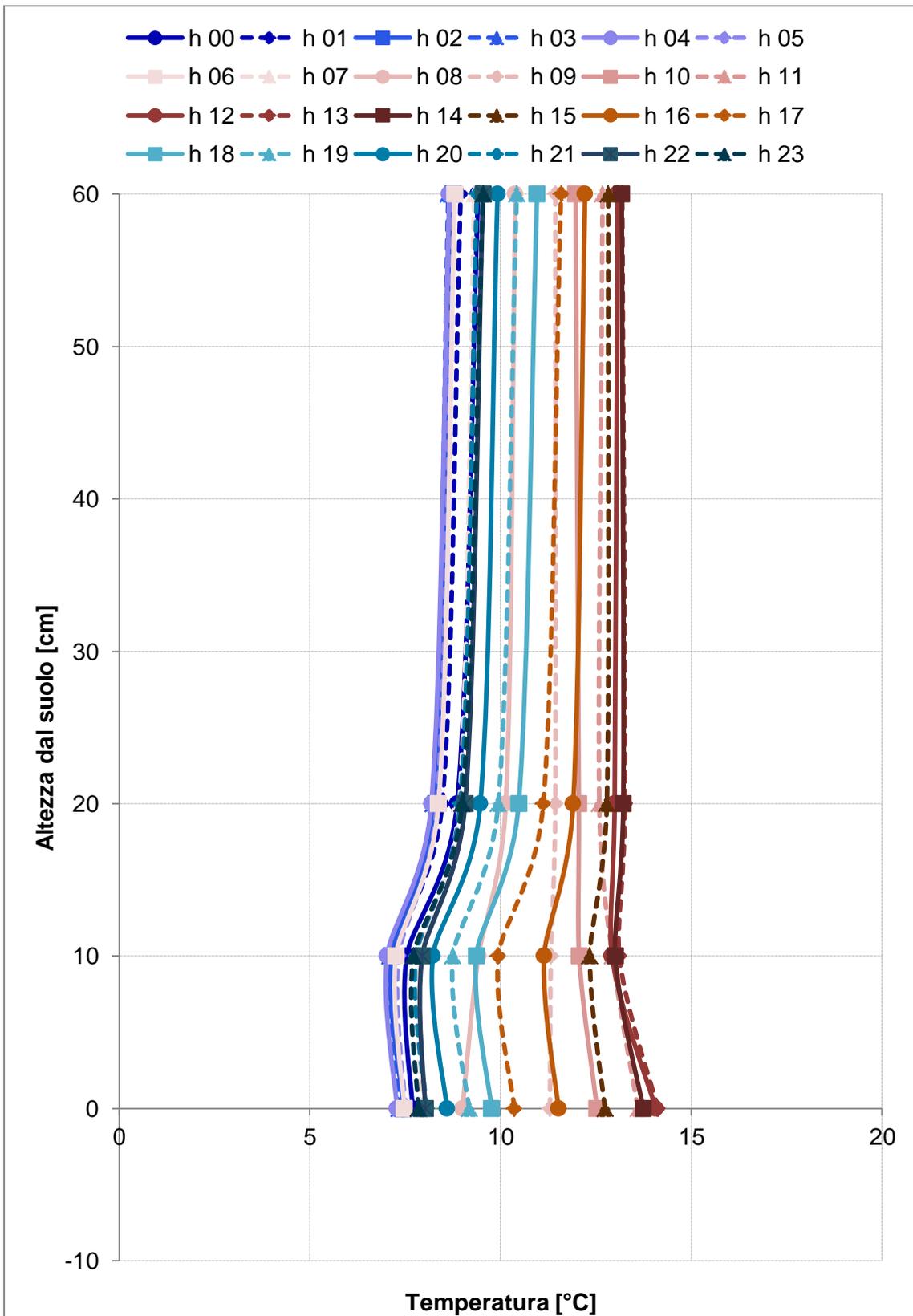


Figura 6.69: andamento medio orario delle temperature registrate dalle termocoppie poste a 0, 10, 20 e 60 cm e dalla sonda FT-90 posta a -10 cm in merito alla copertura a Sedum (GR), in funzione dell'altezza dal suolo, nella settimana fittizia frutto dell'accorpamento dei dati del 18-21 Novembre con quelli del 28-30

per il tetto a Sedum si affiancano a questi valori quelli scaricati dalla sonda FT-90 in merito al substrato (-10 cm).

Le barre d'errore che individuano il primo ed il terzo quartile sono meno estese rispetto alla settimana del 22-29 Ottobre per quanto riguarda il Sedum, mentre il confronto evidenzia un ampliamento della variabilità di circa due gradi per il Native. Tra tutte le quote considerate, quella per cui si registra la minor variabilità dei dati è sempre quella a -10 cm, per le ragioni già illustrate.

Per tutte le quote, ad eccezione di quella concernente la sonda FT-90 del green roof, la temperatura media si aggira attorno ai 12°C.

Si è infine tracciato l'andamento medio orario delle temperature per entrambe le coperture verdi durante la settimana fittizia, con lo scopo di evidenziare i gradienti orari (Figura 6.68 – 6.69).

Concentrandosi in primo luogo sul Sedum, si nota come il valore termico riferito alla superficie del terreno sia inferiore rispetto a quello registrato a -10 cm nelle ore che vanno dalla mezzanotte fino alle sei del mattino. Durante le altre, invece, le temperature registrate superficialmente sono maggiori di quelle all'interno del substrato. Se per il mese di Ottobre tale fenomeno si riscontrava dalle 10 alle 16, ora è percepibile dalle 7 alle 23.

Si registra inoltre una differenza media giornaliera tra 60 e 0 cm di -0.15°C, evidenziando così la presenza rinfrescante del tetto a succulente.

Il Native, dal canto suo, si rivela essere superficialmente più caldo del Green Roof, ma l'effetto rinfrescante a una distanza di 60 cm dal suolo risulta essere superiore. Infatti anche nelle ore più calde le temperature raggiungono al massimo 15.80°C, contro i 17.34°C del Sedum.

L'andamento ondulato del profilo appare diverso rispetto a quelli registrati durante il mese di Ottobre, in cui appariva bombato verso l'esterno sia per le ore notturne che durante il giorno in corrispondenza della quota +10 cm. Vista la scarsità di dati a disposizione per il mese di Novembre, non è possibile concludere se quello tracciato corrisponda ad un'anomalia del profilo o se invece ne rappresenti l'andamento corretto. Tuttavia il comportamento del Native durante le ore notturne può considerarsi confermato.

6.3.3 Comportamento idraulico

Dando per assodata la definizione di evento di pioggia già enunciata all'interno del capitolo 6.3.2.2 per cui si definisce tale quell'evento piovoso a causa del quale non si verifica più deflusso a distanza di 24 ore, è stata posta l'attenzione sull'evento relativo al tardo pomeriggio del 30 Aprile (Figura 6.70), in quanto caratterizzato da un'intensità rientrante nella media mensile. Durante questo episodio precipitano infatti 6.60 mm totali di pioggia e si registra un'intensità massima di 28.80 mm/h.

Mediante i misuratori di livello disposti in corrispondenza dei canali di gronda afferenti alle tre tipologie di copertura oggetto di studio è possibile risalire al valore della portata Q [m^3/s] utilizzando diverse formule presenti in letteratura:

- $Q = 1.42h^{5/2}$
- $Q = 1.34h^{2.48}$
- $Q = \frac{8}{15}C_e\sqrt{2gh}^{2.5}$

Dove h rappresenta il tirante misurato [m] e C_e una costante pari a 0.6.

All'interno di questa tesi si è fatto riferimento alla prima formula.

Dal grafico si nota in primo luogo come i deflussi da parte della copertura tradizionale siano più rapidi di quelli provenienti dalla copertura verde e superiori in volume. Infatti in corrispondenza delle 19:00 all'aumentare dell'intensità di pioggia il Reference presenta un picco notevole (0.289 l/s), che si esaurisce contemporaneamente al termine della pioggia.

Per quanto riguarda il Sedum ed il Native è invece possibile apprezzare l'effetto laminante della copertura verde. Il Sedum presenta infatti una portata massima di 0.021 l/s ed un volume trattenuto pari al 42% di quello piovuto ed il Native una portata massima di 0.004 l/s ed un volume trattenuto pari al 3%.

Rispetto alla guaina bituminosa il tetto verde a Sedum lamina il 93% del picco, mentre il tetto composto da specie autoctone lo lamina addirittura del 99%.

È possibile trovare i dati riassuntivi di questo evento di pioggia in Tabella 6.8.

Si può quindi concludere che le coperture a verde siano un valido sistema per ridurre e ritardare il deflusso delle acque meteoriche in rete, riducendo così l'impatto che la crescente urbanizzazione ha sui corpi idrici ricettori.

Inoltre, le graminacee non solo registrano valori di temperatura inferiori rispetto al Sedum, ma laminano anche maggiormente le portate.

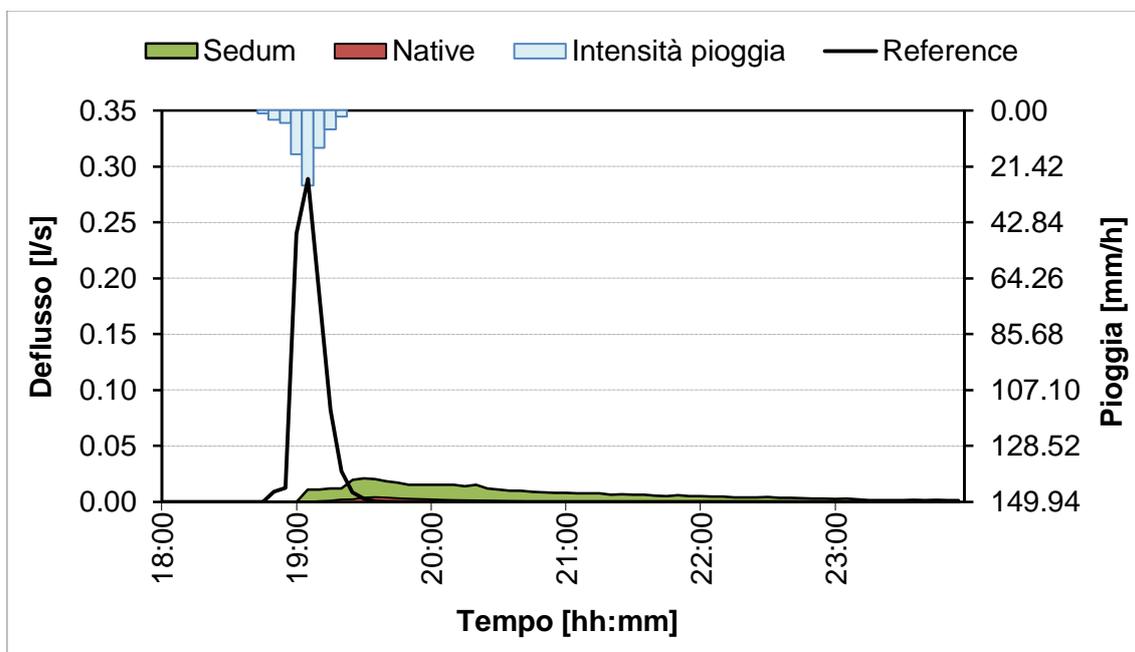


Figura 6.70: evento di pioggia verificatosi il 30 aprile 2014. Sull'asse sinistro delle ordinate sono indicate le portate defluite dal GR (verde), dal NA (rosso) e dal RR (nero), mentre su quello destro i mm/h di pioggia caduti.

i_{max} [mm/h]			W piovuto [m ³]			W defluito [%]		
			RR	GR	NA	RR	GR	NA
28.80			0.258	0.140	0.012	78	42	3
Picco di deflusso [l/s]			Riduz. picco rispetto a RR [%]			Ritardo primo deflusso rispetto al RR [min]		
RR	GR	NA	GR		NA	GR		NA
0.289	0.021	0.004	93		99	10		20

Tabella 6.8: confronto tra i volumi (W) ed i ritardi di deflusso delle tre coperture

7. Modelli di simulazione per lo *urban design*: ENVI-met

Negli ultimi anni anche nel campo della pianificazione urbana sta prendendo piede l'utilizzo di software per valutazioni *ex-ante*.

Grazie alle loro capacità predittive, con questi programmi è possibile realizzare modelli che vengono sfruttati per simulare diversi scenari e valutare gli effetti ambientali di un progetto prima ancora che esso venga realizzato.

Ne esistono molteplici e si distinguono gli uni dagli altri per i parametri presi in considerazione, climatici e non, per la scala di realizzazione del modello e per la complessità del software.

7.1 La scelta del software: ENVI-met

Per agevolarsi nella scelta tra gli svariati software attualmente in commercio, si è fatto riferimento allo studio condotto da Vidmar et al. (54).

In questo report l'autore si focalizza nel trovare il software di simulazione più adatto per la stima della performance urbana sotto il profilo fisico.

Dopo alcune ricerche iniziali, il suo lavoro si concentra sulla valutazione di tre programmi: ENVI-met (3.1), Project Vasari (Beta 2) e IES VE-Pro (6.4).

Egli inoltre suddivide l'analisi in una stima funzionale, legata alle caratteristiche intrinseche del programma, ed in una legata alla fruibilità, ovvero all'esperienza dell'utente e alla facilità d'utilizzo.

1) Stima delle caratteristiche intrinseche:

a) Radiazione solare entrante (insolazione), ossia l'energia legata all'irraggiamento solare ricevuto da una data superficie e registrato in un certo periodo.

L'insolazione si suddivide in irraggiamento diretto da parte del sole e irraggiamento diffuso da parte del cielo. Entrambi questi fenomeni possono essere influenzati dalla presenza di nubi.

Se l'applicazione è in grado di calcolare sia la radiazione solare diretta che quella diffusa dal cielo le sono stati assegnati 10 punti, se non è in grado di calcolarne nessuna 0. Se è in grado di calcolarne solo una, le è stato assegnato un punteggio di 4. Se può calcolarle entrambe, ma non tiene conto

delle nuvole allora ha ricevuto un punteggio pari a 7. Sono stati attribuiti 9 punti se il programma tiene in considerazione tutti e tre i fattori. Sono stati assegnati punti aggiuntivi se il software è in grado di restituire i risultati tramite immagini.

b) Irraggiamento, ovvero la radiazione riflessa da parte degli edifici e dal terreno.

Se l'applicazione non è in grado di calcolarlo, le è stato assegnato un punteggio pari a 0, se ne è capace, invece, riceverà 5 punti. Se tiene conto, inoltre, dei materiali, ne otterrà 10.

c) Movimenti d'aria/vento (CFD)

Il vento gioca un ruolo fondamentale per il comfort dell'utente a livello pedonale ed inoltre aiuta a disperdere gli inquinanti nella città.

Se l'applicazione non riesce a calcolare i movimenti dell'aria, ha ricevuto 0 punti. Se riesce a calcolare un movimento base per stimare la velocità del vento, ne ha avuti 5. Se è in grado di aggiungere sorgenti inquinanti e di calcolarne la dispersione, è stata premiata con 7 punti. Un punto aggiuntivo è stato assegnato alle applicazioni che consentono il caricamento della rosa dei venti, mentre altri due a quelle che possono presentare i risultati in modo grafico nel modello 3d (tramite vettori o mappe a diverse altezze).

d) Assegnazione dei materiali

Le proprietà dei materiali hanno effetti significativi sui calcoli relativi alla trasmissione del calore.

Le superfici edificate sono composte in alta percentuali da materiali non riflettenti e resistenti all'acqua. Per queste ragioni tendono ad assorbire una porzione significativa della radiazione incidente, che viene rilasciata sotto forma di calore.

Se l'applicazione non consente l'assegnazione dei materiali con cui sono realizzati gli edifici, le sono stati attribuiti 0 punti. Se lo consente, ne ha ricevuti 7. Se l'utente può definire un proprio materiale, allora ne ha ottenuti 10.

e) Specchi d'acqua ed evapotraspirazione

L'effetto rinfrescante degli specchi d'acqua dipende principalmente da come l'energia radiante si divide in flusso di calore sensibile e latente. Gli specchi

d'acqua possono assorbire più calore sensibile rispetto alle aree rurali ed inoltre raffrescano la temperatura grazie ad un alto calore latente di evaporazione.

Se l'applicazione non considera la presenza di specchi d'acqua, non le sono stati attribuiti punti. Se è in grado di calcolare l'effetto rinfrescante nell'area circostante, gliene sono stati assegnati 8. Se riesce a distinguere i fiumi dai laghi, allora ne ha avuti 10.

f) Umidità

Essa è utilizzata prevalentemente come parametro di stima per il comfort dell'utente, infatti si considera ideale un'umidità relativa compresa tra il 25 ed il 60%.

Se l'applicazione non la calcola, non ha ricevuto punti; al contrario, se lo fa, ne ha ottenuti 8. Se può distinguere le sorgenti d'umidità (acqua, vegetazione), gliene sono stati attribuiti 10.

g) Vegetazione (alberi ed aree verdi)

La vegetazione ha un aspetto simile a quello degli specchi d'acqua nelle aree urbane. Oltre all'evapotraspirazione, gli alberi garantiscono ombreggiamento durante l'estate, cosa che può diminuire significativamente la temperatura dell'aria ad essi circostante.

Se esiste una libreria di piante predefinita, utilizzabile durante la simulazione, il programma ha ricevuto 6 punti. Se questa libreria è anche personalizzabile, allora ne sono saliti a 10. Se la vegetazione non è inclusa, al contrario ha ottenuto 0 punti.

h) Evapotraspirazione, ovvero la somma dell'evaporazione e della traspirazione della pianta dalla superficie terrestre all'atmosfera.

Se l'applicazione riesce a calcolare la quantità d'acqua rilasciata dall'evaporazione e dalla traspirazione, ha ricevuto 10 punti, altrimenti non ne ha avuti nessuno.

i) Albedo, ossia la riflettività diffusa da parte di una superficie.

Bassi albedo implicano temperature superficiali più alte dato che vengono assorbite quantità maggiori di energia.

Se l'applicazione non tiene conto dell'effetto albedo, ha ricevuto 0 punti. In caso contrario, gliene sono stati assegnati 10.

j) Accuratezza dell'analisi

L'unico modo per capire l'accuratezza dei risultati è quello di confrontarli con i risultati frutto delle misurazioni reali. Per quanto auspicabile, è possibile che questi non coincidano al 100% a causa delle semplificazioni nell'algoritmo e nella geometria urbana. Ciò che è più importante è che la simulazione si comporti in modo simile alla realtà.

Se i risultati provenienti dal motore di simulazione non sono stati convalidati con dati reali e/o modelli matematici alle loro spalle non sono chiari, l'applicazione non ha ricevuto alcun punto. Inoltre, non ne ha ottenuto nessuno anche nel caso in cui i risultati siano stati scorretti. Se l'applicazione è stata testata ma i modelli matematici alle sue spalle non sono stati dichiarati, il programma è stato ricompensato con 8 punti. Ne ha avuti 10, invece, se è stato valutato e convalidato positivamente con misurazioni reali e i calcoli alle sue spalle sono stati divulgati.

k) Caricamento di dati climatici

I dati climatici generalmente possono essere disponibili tramite servizi che raccolgono parametri ambientali quali le medie mensili della radiazione globale, della temperatura, dell'umidità, delle precipitazioni, della velocità e della direzione del vento, delle ore di luce.

Per il seguente studio verranno presi in considerazione:

- La temperatura dell'aria
- L'umidità dell'aria
- La velocità del vento e la sua direzione
- La radiazione solare.

Sono stati assegnati 2 punti all'applicazione se sono presenti tutti questi parametri. Se i dati possono essere scaricati da internet, ha ricevuto dei punti bonus nella stima della fruibilità.

2) Stima della fruibilità:

a) Velocità di calcolo

Per simulare i fenomeni naturali, il computer risolve delle equazioni molto complesse che possono richiedere da pochi minuti a diversi giorni. La velocità con cui l'applicazione è in grado di calcolare il risultato è quindi uno degli interessi principali quando si ha a che fare con l'analisi fisica dell'ambiente urbano.

La velocità di calcolo dipende principalmente da due fattori: la scala e la risoluzione del modello e il computer utilizzato per la computazione.

Siccome non esiste un tipo di analisi che può essere condotta con ognuna di queste applicazioni, l'autore si è concentrato su due aspetti: quanto è rapida l'applicazione nel simulare un'analisi basilare (es: la radiazione solare) e come si comporta quando la dimensione del file viene aumentata.

Sono stati assegnati 4 punti all'applicazione che produce risultati in minor tempo, 3 alla seconda e 2 alla più lenta. Inoltre si sono attribuiti 3 punti all'applicazione i cui tempi di calcolo aumentano linearmente. Se invece aumentano esponenzialmente, il programma ne ha ricevuti 0. Altri 3 punti sono stati assegnati se l'applicazione è in grado di sfruttare più *core* della CPU. Se ne utilizza solo uno, allora ha ricevuto 1 punto.

b) Grafica

Nonostante i modelli utilizzati per le simulazioni fisiche siano numerici, il lavoro coi dati può essere enormemente facilitato utilizzando tipi particolari di grafica per la loro rappresentazione (un'interfaccia grafica per l'utente, finestre 3D interattive, l'uso di grafici o di immagini per rappresentare i risultati,...).

L'applicazione ha ottenuto diversi punteggi a seconda di come soddisfa i criteri seguenti:

- Modello 3D interattivo – 4 punti
- Risultati rappresentabili tramite grafici e tabelle – 4 punti
- Risultati rappresentabili tramite immagini – 2 punti.

c) Semplicità ed intuitività dell'interfaccia

L'interfaccia si riferisce alle informazioni grafiche, testuali ed uditive che il programma presenta all'utente e le sequenze di controllo che l'utente impiega per gestire il programma (l'uso della tastiera, i movimenti col mouse, le selezioni con il *touchscreen*).

Per l'assegnazione del punteggio Vidmar si è domandato se:

- L'interfaccia fosse semplice da usare o se fosse necessario avere a che fare con *configuration file* per far partire le analisi
- L'interfaccia fosse strutturata in modo logico
- Se il lavoro procedesse seguendo il processo logico dello *urban design*
- Se l'interfaccia fosse consistente ed i controlli fossero trovati facilmente.

d) Facilità d'apprendimento

La facilità d'apprendimento è una delle caratteristiche chiave di un software.

Per dare un punteggio in questo caso l'autore si è chiesto:

- Se la procedura di installazione fosse semplice
- Se fosse necessario conoscere i processi fisici che si devono simulare
- Quanto tempo ci volesse per ottenere i primi risultati dall'applicazione
- Se si riuscisse ad imparare ad usare il programma velocemente o se ci volesse molto tempo
- Se si potessero caricare i dati climatici da internet
- Se si potessero far correre più simulazioni alla volta.

e) Documentazione relativa al software

Tale documentazione ha la funzione di spiegare come opera il software e/o come utilizzarlo; questo può essere svolto per esempio tramite video tutorial.

Per assegnare un punteggio Vidmar si è basato sulle domande seguenti:

- la documentazione garantisce la giusta quantità di informazioni per iniziare ad usare il programma?
- Ci sono tutorial disponibili?
- La documentazione fornisce informazioni sui metodi utilizzati per il raggiungimento dei risultati?

f) Supporto tecnico e da parte della *community*

Una *community* forte e presente ed un supporto tecnico efficiente rappresentano due potenti strumenti per garantire assistenza agli operatori.

Per assegnare un punteggio sono stati confrontati il numero dei membri della *community*, l'attività del forum ufficiale (se esiste) e la disponibilità di un supporto tecnico.

L'applicazione con la migliore *community* ha ricevuto 6 punti, fino a 3 per quella più debole. Se la *community* non esisteva, ha ricevuto solo 1 punto. Sono stati attribuiti 4 punti aggiuntivi nel caso fosse disponibile anche un supporto tecnico.

g) Licenza, costi ed attività di sviluppo

La domanda più importante da porsi in merito alla licenza è se l'applicazione è *open source* oppure privata. Nel primo caso sarebbe possibile per gli utenti modificare il software in prima persona, nel secondo generalmente gli algoritmi eseguiti dal software sono tenuti segreti per proteggere gli interessi dello sviluppatore.

Se il programma è in pieno sviluppo, inoltre, si potrebbe compensare lo svantaggio di trovarsi davanti ad un programma a pagamento.

Sono stati così assegnati 5 punti alle applicazioni *open source*, 3 a quelle private ma gratuite ed 1 a quelle private a pagamento.

Se l'applicazione è sotto costante sviluppo (ultimo aggiornamento non più vecchio di sei mesi), riceverà 5 punti. Se questo risale a più di un anno fa, ne ha ricevuti 3; altrimenti, per periodi superiori, 1.

Per una descrizione meticolosa dell'assegnazione dei punteggi per ogni singola voce si rimanda allo studio originario.

In Tabella 7.1 sono riassunti i punteggi parziali e totali relativi all'analisi.

Alcune voci dello studio iniziale non sono state riportate in quanto non alteravano il risultato finale, altre invece, contrassegnate da un asterisco, sono state aggiornate modificandone il punteggio. Così facendo i risultati finali differiscono solo quantitativamente rispetto allo report di Vidmar.

In conclusione si evince come ENVI-met risulti il software più completo per affrontare un'analisi ambientale a livello urbano, anche se gli altri due programmi non hanno ottenuto punteggi poi così inferiori.

Per queste ragioni tale programma è stato scelto per condurre le simulazioni relative a questa tesi.

Caratteristiche intrinseche	Peso	ENVI-met	Project Vasari	IES VE-Pro
Radiazione solare entrante	10	5 ->50	5 ->50	7 ->70
Irraggiamento	6	3 ->18	0 ->0	0 ->0
Movimenti d'aria	10	8 ->80	8 ->80	9 ->90
Assegnazione dei materiali	8	5 ->40	7 ->56	10 ->80
Specchi d'acqua ed evapotraspirazione	8	8 ->64	0 ->0	7 ->56
Umidità	6	10 ->60	0 ->0	3 ->30
Vegetazione	6	10 ->60	2 ->20	3 ->30
Evapotraspirazione	3	0 ->0	0 ->0	0 ->0
Albedo	6	8 ->48	0 ->0	0 ->0
Accuratezza dell'analisi	8	10 ->80	8 ->64	8 ->64
Caricamento di dati climatici	10	10 ->100	8 ->80	10 ->100
		70% 74%	42% 49%	54% 63%
Fruibilità				
Velocità di calcolo	7	6 ->42	10 ->70	4 ->28
Grafica	8	6 ->48	10 ->80	8 ->64
Semplicità ed intuitività dell'interfaccia	6	3 ->18	8 ->48	5 ->30
Facilità d'apprendimento	6	4* ->24	8 ->48	5 ->30
Documentazione relativa al software	8	7 ->56	10 ->80	6 ->48
Supporto tecnico e della community	7	7 ->49	7 ->49	10 ->70
Licenza, costi ed attività di sviluppo	5	10* ->50	8 ->40	7 ->35
		61% 61%	87% 88%	64% 65%
Totale		127	111	110
Totale ponderato		943	849	865
Classifica finale		1	3	2

Tabella 7.1: risultati dell'analisi condotta da Vidmar et al. (54). I valori contrassegnati da asterisco sono stati aggiornati rispetto all'analisi originaria in quanto il 31 ottobre 2014 è stata rilasciata una nuova versione di ENVI-met ed inoltre l'autore non aveva considerato la possibilità di far correre più simulazioni contemporaneamente col medesimo programma (seppure non particolarmente consigliato).

7.2 Com'è strutturato ENVI-met

ENVI-met è un software per la modellazione microclimatica tridimensionale non idrostatica ideato dal Prof. Michael Bruse del Gruppo di Modellazione Ambientale dell'Università di Mainz.

Il programma è stato progettato per simulare le interazioni superficie-pianta-aria soprattutto all'interno del contesto urbano con una risoluzione orizzontale tipica di 0.5-10 m per un periodo di tempo caratteristico di 24-48 ore con intervalli di massimo 10 secondi. Questa risoluzione permette di analizzare le interazioni a piccola scala tra i singoli edifici, le superfici e la vegetazione presente.

Si tratta di un software gratuito, ma non Open Source, basato su diversi progetti di ricerca scientifica e quindi è in costante sviluppo.

Per questo studio è stata utilizzata la versione 3.1 beta 4 scaricabile direttamente dal sito ufficiale <http://envi-met.net/> sezione download previa registrazione, ma dal 31 ottobre è disponibile anche la versione 4.

Tramite l'icona di ENVI-Start si apre una piccola finestra composta da diversi bottoni (Figura 7.1), ognuno dei quali rimanda ad una finestra specifica: Eddi, Configuration Editor, ENVI-met Default Config, Leonardo ed Extract.

Come illustrato in Figura 7.2, il software si articola in:

- 1) La fase di input, i cui componenti principali sono il Configuration File, l'Area Input File ed i database
- 2) La fase simulativa
- 3) La fase di output e di lettura dei risultati.

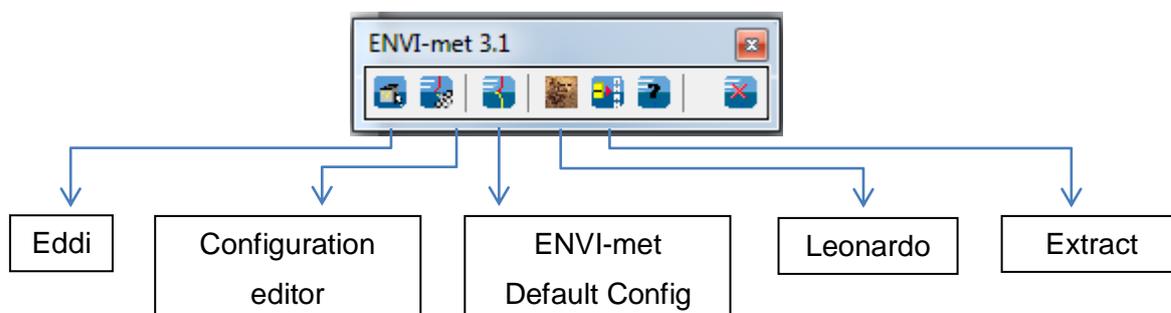


Figura 7.1: schermata iniziale di ENVI-Start.

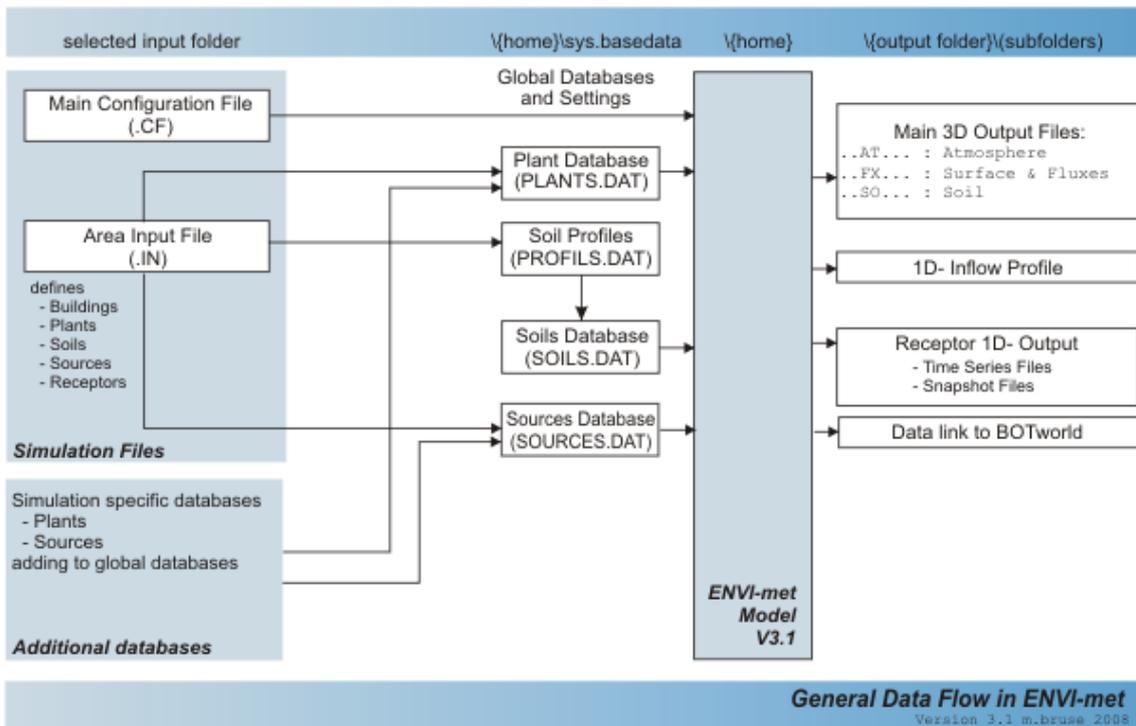


Figura 7.2: schema relativo alle fasi svolte da ENVI-met (55)

7.2.1 L'Area Input File

Alla fase di input si accede tramite il bottone ENVI-Eddi, e premendolo ci si presenta una schermata come quella in Figura 7.3.

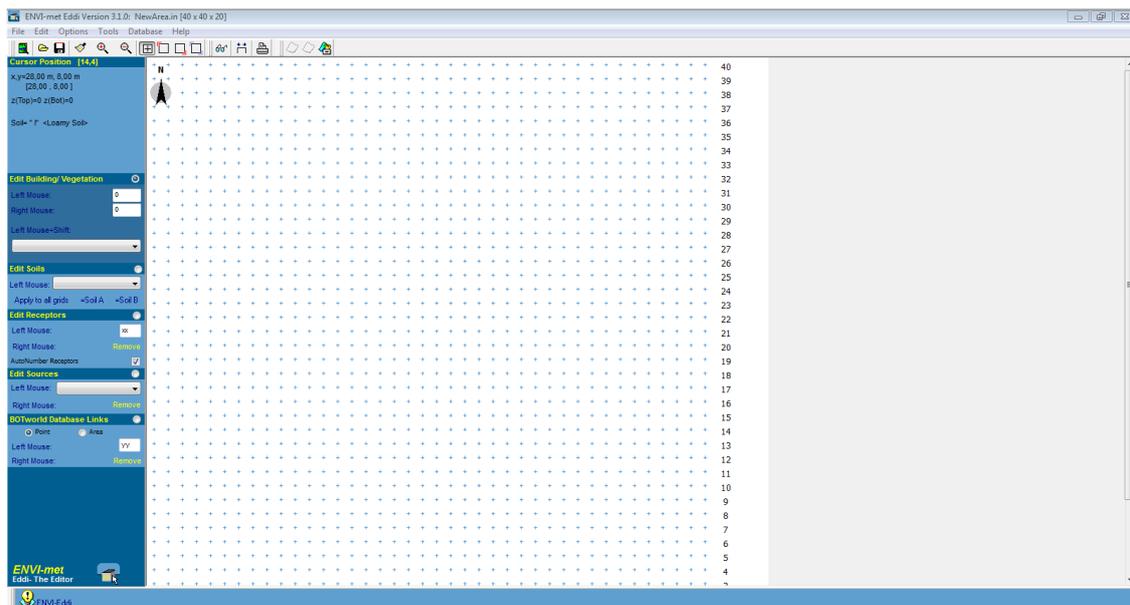


Figura 7.3: interfaccia di ENVI-Eddi.

In questa prima fase è possibile definire gli Area Input Files (.AI). Essi sono tra i file basilari di ENVI-met in quanto specificano la geometria dell'ambiente in termini di edifici, piante o suolo.

Nello specifico le informazioni immagazzinate nell'Area Input File includono:

- Posizione ed altezza degli edifici
- Posizione delle piante
- Distribuzione dei materiali superficiali e dei tipi di suolo
- Posizione delle sorgenti
- Posizione dei ricettori
- Posizione geografica della *location* sulla Terra.

In primo luogo è necessario definire un dominio e questo è possibile premendo la prima icona sulla sinistra. Così facendo, si aprirà una schermata come quella di Figura 7.4, di cui si procede ad analizzare i contenuti più nello specifico.

1) Number of grids and nesting properties:

- a) Main model area: i valori x ed y definiscono la matrice alla base della griglia; inoltre è necessario specificare anche la dimensione z.
- b) Nesting grids around main area: il modello non è in grado di calcolare i valori reali per i punti della griglia in prossimità dei bordi e soprattutto sul bordo stesso. Si può quindi ricorrere a delle ipotesi:

Change or create model Domain

Number of grids and nesting properties

Main model area:

x-Grids: 40 y-Grids: 40 z-Grids: 20

Nesting grids around main area:

Nr of nesting grids: 3

Soil profil ID for nesting grids

Soil A: | <Loamy Soil>

Soil B: | <Loamy Soil>

Grid size and structure in main area

Size of grid cell in meter:

dx= 2.00 dy= 2.00 dz= 2.00 (base height)

Method of vertical grid generation:

equidistant (all dz are equal except lowest grid box)

telescoping (dz increases with height)

Telescoping factor (%): 0

Start telescoping after height (m): 0.00

Geographic Properties

Model rotation out of grid north: 0.00

Location on earth

Name of location: Essen/ Germany

Position on earth: Latitude (deg. +N, -S): 53.00

Longitude (deg. -W, +E): 7.00

Reference time zone: Name: CET/UTC+1

Reference longitude: 15.00

Georeference

Co-ordinate of lower right grid x-value: 0.00

y-value: 0.00

Reference system: <plane>

Model area description: A brave new area

Create new area

Apply changes

Cancel

Figura 7.4: schermata relativa alla creazione di un nuovo dominio.

- Che i valori siano costanti in corrispondenza dei bordi (closed boundary conditions o forced boundary conditions)
- Che i valori dei punti interni alla griglia siano copiati sui bordi (open boundary conditions)
- Si possono copiare i valori dall'outflow boundary avanti e indietro nell'inflow boundary (cyclic boundary conditions).

Più nesting grids vengono usate, minore è la possibilità di avere problemi numerici a causa di uno o più bordi del modello che interferiscono con le dinamiche interne allo stesso.

2) Grid size and structure in main area:

a) Size of grid cell in meter: definisce la dimensione di un quadrato della griglia in metri nelle direzioni x, y e z. Così facendo è possibile scalare il modello originario della quantità desiderata, ma maggiore sarà la dimensione di una cella minore sarà la risoluzione del modello.

b) Method of vertical grid generation:

- Equidistant: la griglia equidistante ha la stessa spaziatura tra tutti i livelli verticali ad eccezione di quello più in basso, il quale è diviso in 5 sottolivelli con $\Delta z = 0.2\Delta z$. Nel punto precedente bisogna immettere il Δz (in quel caso indicato con dz) per i riquadri non suddivisi.

Questa griglia è consigliata se il dominio del modello è di altezza limitata e i processi a tutte le altezze sono di interesse paragonabile.

- Telescoping: le griglie telescopiche consentono di coprire un'altezza maggiore senza terminare i punti della griglia. Questa tipologia dovrebbe essere usata se il dominio del modello contiene degli oggetti alti (es: grattacieli) che devono essere inclusi, ma i processi nella parte alta del modello sono di minore interesse.

Per una visione più chiara si dia uno sguardo alla Figura 7.5.

3) Geographic properties: definisce il posizionamento dell'area di studio in termini di nomenclatura, coordinate geografiche e di fuso orario.

- a) Model rotation out of grid north: consente di specificare la rotazione del modello rispetto al Nord. Valori positivi faranno ruotare il Nord in senso antiorario.

- b) Location on earth: consente di settare città e nazione corrispondente in termini di coordinate e di Reference time zone rispetto al meridiano di Greenwich.

In ENVI-Eddi non è purtroppo possibile importare un modello 2D o 3D creato in precedenza con un altro programma, ma tramite l'ultimo bottone sulla destra si ha la facoltà importare un'immagine Bitmap di sfondo da utilizzare come base per il ricalco. Chiaramente anch'essa dovrà essere delle dimensioni della griglia appena definita.

Ora è finalmente possibile procedere alla fase di modellizzazione vera e propria. La fascia blu sulla sinistra contiene tutte le variabili che è possibile inserire (edifici, vegetazione, tipo di suolo, punti ricettori o sorgenti).

I menù a tendina afferenti ad essa mostrano i contenuti dei database di default. Questi comprendono:

- Un database per le piante, PLANT.DAT
- Uno per i tipi di suolo, SOIL.DAT
- Uno per le pavimentazioni, PROFILES.DAT
- Uno per la sorgenti degli inquinanti, SOURCES.DAT.

Essi sono personalizzabili tramite la tendina del menù principale Database/Edit .DAT.

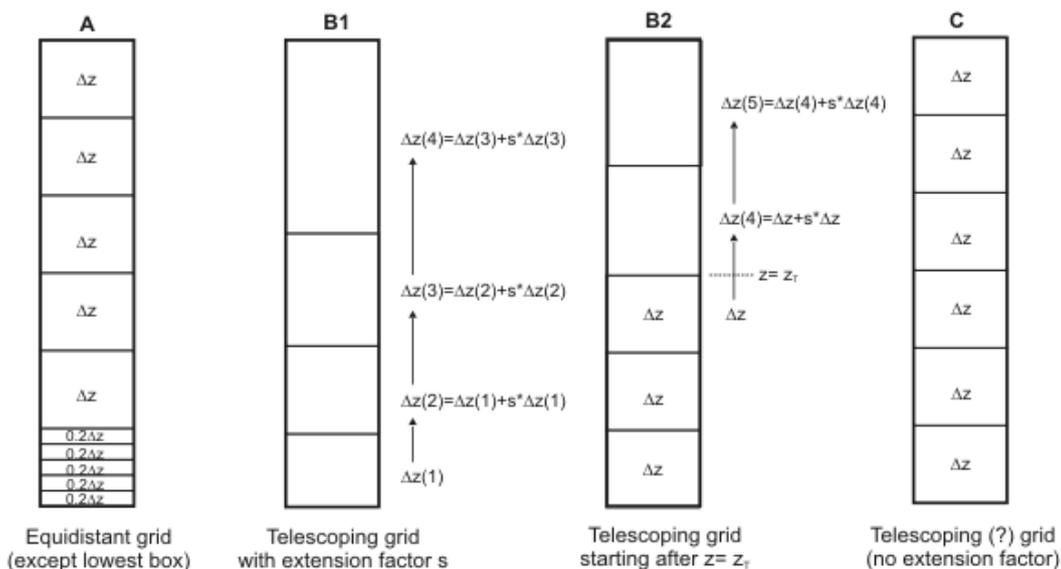


Figura 7.5: griglie verticali disponibili in ENVI-met (55)

7.2.2 Il Configuration File

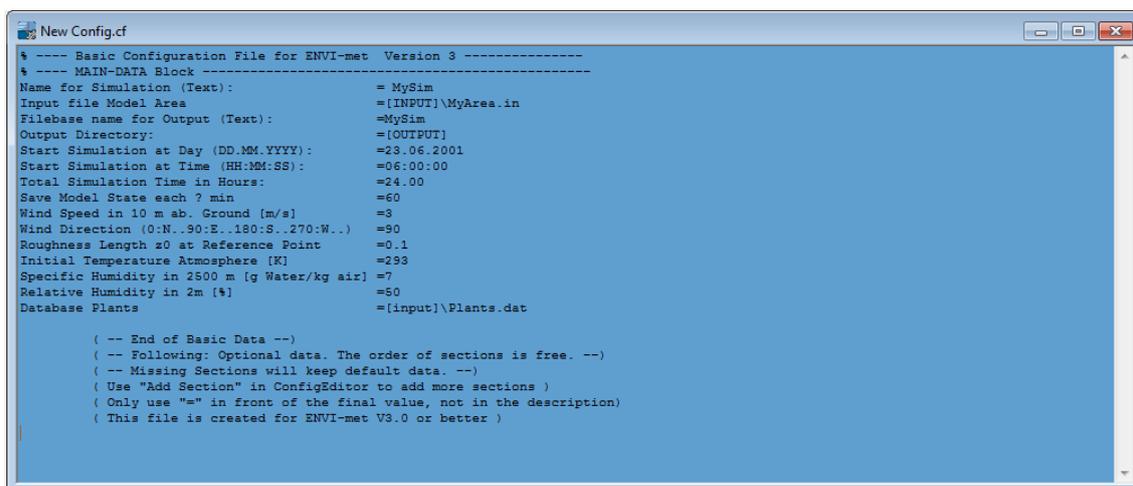
Premendo il secondo bottone della schermata iniziale di ENVI-met 3.1 ci si presenta il Configuration Editor, ovvero quella parte di ENVI-met all'interno della quale è possibile realizzare il Configuration File (.CF) (Figura 7.6).

Questo file definisce le impostazioni necessarie per la simulazione tramite una serie di righe che vengono codificate poi quando viene fatto correre il programma e per questa ragione è importante non cambiarne l'ordine.

Nello specifico queste righe rappresentano:

- 1) Name for Simulation, ovvero il nome con cui identificare la simulazione.
- 2) Input File Model Area
In questo spazio andrà specificato il percorso all'interno del pc in cui è allocato il file .ai relativo al file .cf che si sta creando.
- 3) Filebase name for Output, ovvero il nome che verrà assegnato ai file output frutto della simulazione.
- 4) Output Directory, ovvero la cartella all'interno della quale si desiderano inserire i file di output.
- 5) Start Simulation at Day (DD.MM.YYYY), ossia la data del giorno che si intende simulare.
- 6) Start Simulation at Time in Hours, ovvero l'orario a partire dal quale si effettuerà la simulazione.

Quando si inserisce questo valore bisogna tenere presente che ENVI-met



```
New Config.cf
% ---- Basic Configuration File for ENVI-met  Version 3 ----
% ---- MAIN-DATA Block ----
Name for Simulation (Text):           = MySim
Input file Model Area                 = [INPUT]\MyArea.in
Filebase name for Output (Text):      = MySim
Output Directory:                     = [OUTPUT]
Start Simulation at Day (DD.MM.YYYY): = 23.06.2001
Start Simulation at Time (HH:MM:SS):  = 06:00:00
Total Simulation Time in Hours:       = 24.00
Save Model State each ? min:         = 60
Wind Speed in 10 m ab. Ground [m/s]  = 3
Wind Direction (0:N..90:E..180:S..270:W..) = 90
Roughness Length z0 at Reference Point = 0.1
Initial Temperature Atmosphere [K]    = 293
Specific Humidity in 2500 m [g Water/kg air] = 7
Relative Humidity in 2m [%]           = 50
Database Plants                       = [input]\Plants.dat

( -- End of Basic Data --)
( -- Following: Optional data. The order of sections is free. --)
( -- Missing Sections will keep default data. --)
( Use "Add Section" in ConfigEditor to add more sections )
( Only use "=" in front of the final value, not in the description)
( This file is created for ENVI-met V3.0 or better )
```

Figura 7.6: schermata iniziale del Configuration Editor.

necessita di un primo periodo di inizializzazione, per tanto è consigliabile fare partire la simulazione durante la notte oppure all'alba, così che i calcoli possano seguire i processi atmosferici.

- 7) Total simulation time in hours, ovvero il periodo di tempo che si desidera simulare espresso in ore.

Questo periodo dovrà essere almeno di sei ore, sempre a causa del periodo di inizializzazione che altrimenti starà ancora influenzando i risultati.

- 8) Save model state each ? min, ossia l'intervallo di tempo ogni cui si vogliono estrarre i risultati principali della simulazione sul disco (per i ricettori è possibile specificare il rispettivo intervallo). In aggiunta viene anche scritto un file cumulativo una volta terminata la simulazione.

- 9) Wind Speed in 10 m above ground, ovvero la velocità del vento a 10 m da terra. Questo rappresenta il primo parametro meteorologico in input, ma non viene più sfruttato dopo l'inizializzazione.

- 10) Wind direction rappresenta la direzione del vento, dove 0° rappresenta il Nord, 90° l'Est e così via.

Bisogna fare particolare attenzione se si è ruotato il Nord all'interno dell'Area Input File ed adattare il valore.

- 11) Roughness Length z_0 at Reference Point definisce la scabrezza del luogo in cui viene svolta la simulazione nel punto in cui è stata misurata la velocità del vento a 10 m.

Essendo un valore complementare alla velocità del vento, entrambi i valori sono utilizzati per il calcolo del vento geostrofico, che però non viene più considerato al termine dell'inizializzazione.

- 12) Initial Temperature Atmosphere setta il valore iniziale per tutti i livelli dell'atmosfera e la temperatura costante di riferimento a 2500 m d'altezza.

La temperatura è espressa in Kelvin e nello specifico rappresenta la temperatura potenziale, ovvero la temperatura che una particella di fluido alla pressione p avrebbe se fosse portata, tramite uno spostamento adiabatico, ad una pressione standard di riferimento p_0 , in genere pari ad 1 bar. La temperatura potenziale si indica solitamente con θ e, per l'aria, è espressa da:

dove T è la temperatura assoluta della particella, R la costante dei gas per l'aria e c_p il calore specifico a pressione costante.

ENVI-met inizia con un gradiente nullo e lascia che la stratificazione termica si sviluppi durante l'inizializzazione basandosi sulla temperatura iniziale delle superfici.

- 13) Specific Humidity in 2500 m [g Water/kg air] rappresenta il valore di umidità specifica relativa alla sommità del modello.

In linea di massima viene definito dalla massa d'aria definita dalla mesoscala e viene mantenuta costante durante la simulazione.

- 14) Relative Humidity in 2m, ovvero l'umidità relativa espressa in percentuale a 2 m dal suolo.

Essa viene usata insieme al dato precedente per calcolare il gradiente di umidità verticale, nonostante sia un valore che non viene più preso in considerazione dopo il periodo di inizializzazione.

- 15) Database Plants indica l'allocazione del database di riferimento per la vegetazione.

Questa linea non viene più interpretata dal programma, ma deve essere mantenuta.

Quelli appena descritti rappresentano i parametri minimi necessari all'avvio della simulazione.

È possibile però aggiungere delle sezioni specifiche tramite il bottone Add Section per personalizzare ulteriormente il file. Tra questi è possibile citare:

- 1) [SOILDATA], che permette di settare la temperatura iniziale e l'umidità del suolo all'interno del modello;
- 2) [TIMING], che definisce gli intervalli di tempo con cui vengono estratti e salvati i risultati dei processi;
- 3) [BUILDING], che consente di definire le caratteristiche degli edifici presenti nel modello;
- 4) [CLOUDS], che permette l'inserimento di nuvole all'interno della computazione che altrimenti sarebbe predisposta per una giornata di cielo sereno;
- 5) [SOLARADJUST], che consente di correggere il calcolo della radiazione solare ad onde corte effettuato dal software. Verrà scalato l'intero ciclo solare, e non soltanto alcune ore specifiche.

7.2.3 ENVI-met Default Config

Alla fase di elaborazione dati si accede tramite il bottone ENVI-met Default Config. Premendolo sarà in primo luogo richiesto quale versione aprire tra la 100x100x30, la 180x180x30 o la 250x250x30 in funzione della grandezza della griglia impostata nel file .ai. Una volta effettuata la scelta, ci si presenta una schermata come quella in Figura 7.7.

La prossima operazione da effettuare è il caricamento del modello, per farlo è sufficiente premere dalla barra laterale sulla destra Load Model configuration dalla tendina Model Environment.

Fatto ciò, tramite la tendina sulla sinistra 'Output Settings', è possibile definire i parametri che si vogliono ottenere in output dal programma. Tra di essi si cita la velocità e la direzione del vento, la temperatura potenziale dell'aria, l'umidità specifica, la radiazione diretta ed indiretta ad onde corte e lo Sky View Factor.

Prima di lanciare la simulazione vera e propria è consigliabile controllare se il modello presenta problemi. Quest'operazione è possibile tramite il pulsante sulla sinistra Test model configuration all'interno della tendina Test Model. Così facendo sarà ENVI-met stesso ad indicare eventuali problemi e a suggerire correzioni.

Ora è finalmente possibile lanciare la simulazione tramite il pulsante Start this model.

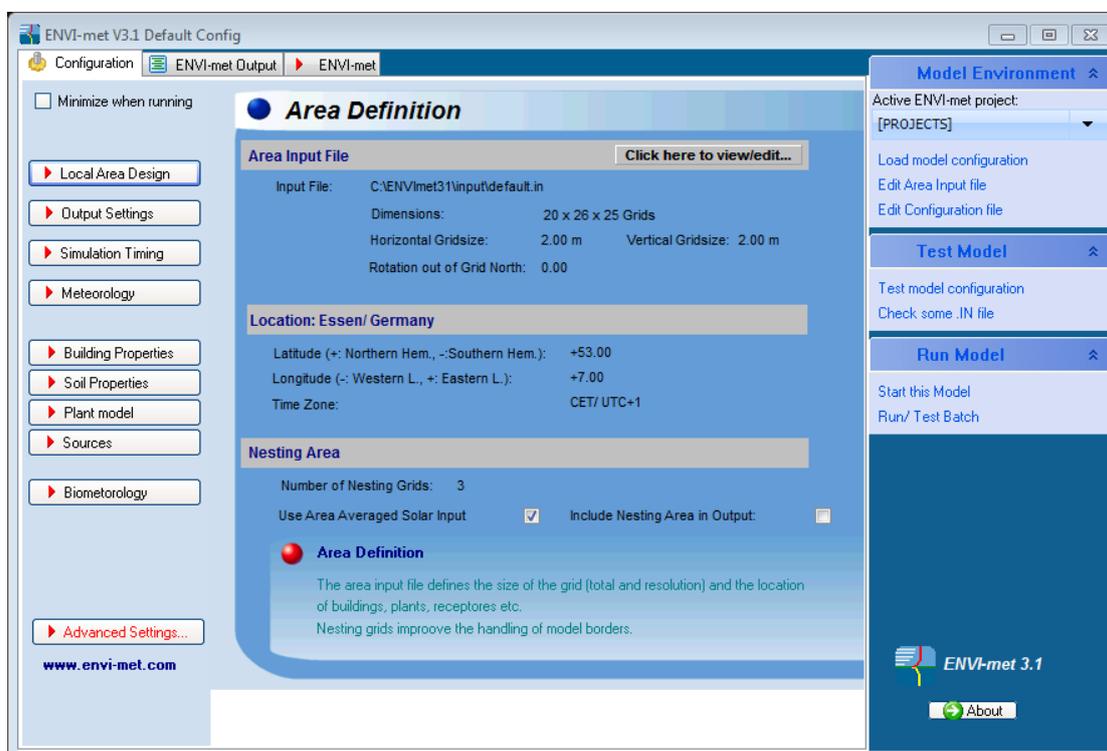


Figura 7.7: schermata iniziale di ENVI-met Default Config.

7.2.4 Leonardo 2014

Dal 31 Ottobre è disponibile Leonardo 2014 come software per l'interpretazione grafica dei risultati di ENVI-met. Prima era sufficiente la versione precedente che veniva automaticamente installata con ENVI-met 3.1.

Si tratta di un programma che, dopo aver caricato i file .EDT frutto della simulazione, consente di graficare per immagini una specifica variabile tra quelle scelte in output e di effettuare dei confronti tra di esse (ad esempio a diverse ore del giorno).

All'estrema destra il DataNavigator consente il caricamento dei file e di specificare il tipo di sezione che s'intende effettuare, se in alzato o una planimetria, e a quale coordinata. Le planimetrie vengono realizzate diversamente in funzione della griglia verticale scelta per l'Area Input File.

Nella parte centrale della finestra di lavoro si presenta un cartiglio, all'interno del quale comparirà l'Area Input File con evidenziata la variabile prescelta e la rispettiva legenda (Figura 7.8).

Sulla sinistra è invece possibile gestire nel dettaglio le singole aree del cartiglio, definendo scale, colori e font.

In questa versione è anche possibile estrapolare delle rappresentazioni tridimensionali del modello e realizzare dei video, montando le singole immagini.

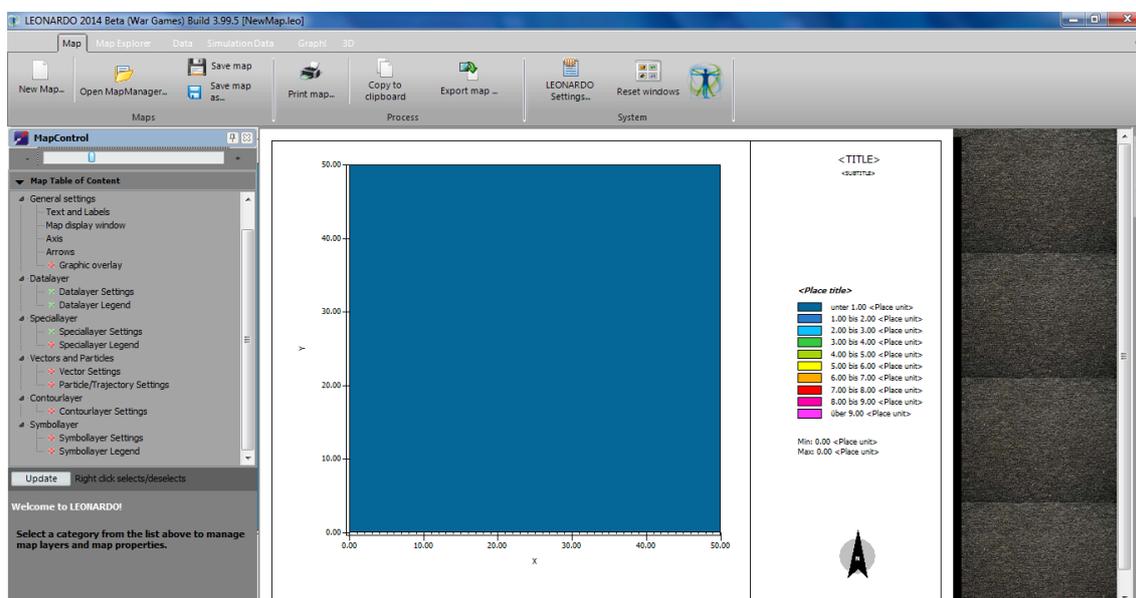


Figura 7.8: schermata iniziale di Leonardo 2014.

7.3 Il modello fisico

Le variabili principali calcolate all'interno di ENVI-met sono:

- La velocità e la direzione del vento
- La temperatura dell'aria e del suolo
- L'umidità dell'aria e del suolo
- La turbolenza
- I flussi radiativi
- La vegetazione.

Per il loro calcolo il programma si avvale di diversi sottomodelli (Figura 7.9) affiancati l'uno all'altro.

7.3.1 Il vento

Lo sviluppo temporale e spaziale della velocità e della direzione del vento è calcolato utilizzando le equazioni tridimensionali non idrostatiche di Navier-Stokes:

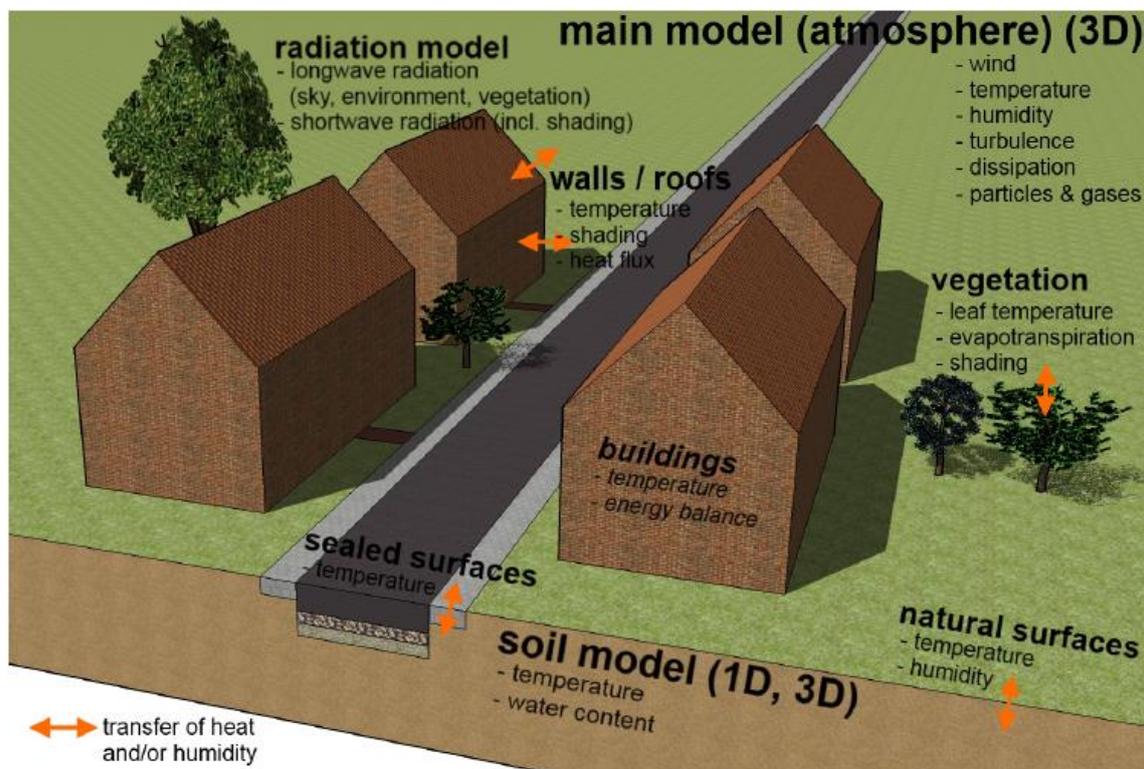


Figura 7.9: schema rappresentativo dei sottomodelli presenti all'interno di ENVI-met (56)

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \\ = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p'}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(K_m \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_m \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_m \frac{\partial u}{\partial z} \right) + f(v - v_g) \\ - S_u(x, y, z) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \\ = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p'}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left(K_m \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_m \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_m \frac{\partial v}{\partial z} \right) + f(u - u_g) \\ - S_v(x, y, z) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \\ = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p'}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left(K_m \frac{\partial w}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_m \frac{\partial w}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_m \frac{\partial w}{\partial z} \right) - S_w(x, y, z) \end{aligned}$$

p' rappresenta la pressione locale di perturbazione e K_m il coefficiente di scambio locale. Il parametro di Coriolis f descrive la rotazione del vento a livello del terreno in confronto alle componenti geostrofiche del vento, u_g e v_g . Tale parametro può essere calcolato come $f = 2\Omega \sin \varphi$, dove $\Omega = 7 \cdot 10^{-5} \text{s}^{-1}$ rappresenta la frequenza della rotazione terrestre e φ la latitudine a cui è allocato il modello.

S_u , S_v e S_w rappresentano le sorgenti locali che modellano l'evoluzione del vento in corrispondenza di ostacoli semipermeabili, come la vegetazione. Quando l'aria soffia attraverso un corpo permeabile si genera un gradiente di pressione lungo la direzione i della componente del vento u_i ($u_i = u, v, w$ con $i = 1, 2, 3$).

L'influenza di questo gradiente di pressione sul vento può essere descritto tramite:

$$S_{u_i}(x, y, z) = \left. \frac{\partial p''}{\partial x_i} \right|_p = c_{d,p} LAD(x, y, z) u_i W(x, y, z)$$

Dove LAD rappresenta la Leaf Area Density [m^2/m^3], $c_{d,p}$ il coefficiente di trascinamento meccanico delle foglie e $W(x, y, z)$ la velocità media del vento all'interno delle celle della griglia.

$$W(x, y, z) = \sqrt{u^2(x, y, z) + v^2(x, y, z) + w^2(x, y, z)}$$

Il coefficiente di trascinamento meccanico è posto pari a 0.2.

L'approssimazione di Boussinesq viene utilizzata per eliminare la densità ρ dalle equazioni di Navier-Stokes, che possono quindi scriversi come:

$$\begin{aligned}\frac{\partial u}{\partial t} + u_i \frac{\partial u}{\partial x_i} &= -\frac{\partial p'}{\partial x} + K_m \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x_i^2} \right) + f(v - v_g) - S_u \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u_i \frac{\partial v}{\partial x_i} &= -\frac{\partial p'}{\partial y} + K_m \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x_i^2} \right) + f(u - u_g) - S_v \\ \frac{\partial w}{\partial t} + u_i \frac{\partial w}{\partial x_i} &= -\frac{\partial p'}{\partial z} + K_m \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x_i^2} \right) + g \frac{\theta(z)}{\theta_{ref}(z)} - S_w\end{aligned}$$

Siccome l'aria non viene trattata in qualità di fluido incomprimibile, deve essere soddisfatta l'equazione di continuità:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

7.3.2 Temperatura ed umidità

La temperatura potenziale θ può essere calcolato utilizzando l'equazione combinata di advezione-diffusione:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + u_i \frac{\partial \theta}{\partial x_i} = K_h \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial x_i^2} \right) + \frac{1}{c_p \rho} \frac{\partial R_{lw}}{\partial z} + \frac{1}{c_p \rho} \frac{\partial R_{lw}}{\partial z} Q_\theta$$

Q_θ è il termine che definisce lo scambio di calore tra l'aria e la vegetazione, mentre K_h rappresenta il coefficiente di scambio turbolento per il calore. Il termine $\frac{1}{c_p \rho} \frac{\partial R_{lw}}{\partial z}$ descrive la variazione di temperatura a causa della divergenza della radiazione ad onde lunghe.

Per l'umidità l'equazione di advezione-diffusione può assumere l'aspetto di:

$$\frac{\partial q}{\partial t} + u_i \frac{\partial q}{\partial x_i} = K_q \left(\frac{\partial^2 q}{\partial x_i^2} \right) + Q_q$$

Q_q definisce lo scambio d'umidità tra l'aria e la vegetazione e K_q identifica il coefficiente di scambio turbolento per l'umidità.

ENVI-met non modella la fase di trasformazione dell'acqua in vapore e viceversa. Questo implica che l'umidità relativa sarà sempre inferiore al 100%.

7.3.3 La turbolenza atmosferica

ENVI-met utilizza un modello di chiusura della turbolenza 1.5d. Questo si basa sui lavori di Mellor e Yamada [Mellor e Yamada, 1974] ed aggiunge due equazioni per la turbolenza (E) e la sua dissipazione (ϵ):

$$\frac{\partial E}{\partial t} + u_i \frac{\partial^2 E}{\partial x_i^2} = K_E \left(\frac{\partial^2 E}{\partial x_i^2} \right) + Pr - Th + Q_E - \epsilon$$

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial t} + u_i \frac{\partial^2 \epsilon}{\partial x_i^2} = K_\epsilon \left(\frac{\partial^2 \epsilon}{\partial x_i^2} \right) + c_1 \frac{\epsilon}{E} Pr - c_3 \frac{\epsilon}{E} Th + c_2 \frac{\epsilon^2}{E} + Q_\epsilon$$

Le costanti c_1, c_2, c_3 sono costanti empiriche. I valori utilizzati all'interno di ENVI-met sono prese da Launder e Spalding [Launder e Spalding, 1974]:

$$c_1 = 1.44 \quad c_2 = 1.92 \quad c_3 = 1.44$$

I termini Pr e Th denotano la produzione e la dissipazione d'energia turbolenta causata dalla dispersione longitudinale del vento (Pr) e dalla stratificazione termica (Th). Possono essere scritti come:

$$Pr = K_m \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j}$$

$$Th = \frac{g}{\theta_{ref}(z)} K_h \frac{\partial \theta}{\partial z}$$

$\theta_{ref}(z)$ rappresenta la temperatura potenziale in ingresso alla quota z. In condizioni di stabilità Th può essere trascurato.

La turbolenza indotta dalla vegetazione Q_E e la cascata di energia turbolenta da larga scala a quelle inferiori prossime al fogliame Q_ϵ possono essere descritte da:

$$Q_E = c_{d,f} LAD(z) \cdot W^3 - 4c_{d,f} LAD(z) \cdot |W| \cdot E$$

$$Q_\epsilon = 1.5c_{d,f} LAD(z) \cdot W^3 - 6c_{d,f} LAD(z) \cdot |W| \cdot \epsilon$$

I coefficienti di diffusione sono ricavati dal campo $E - \epsilon$ assumendo una locale isotropia della turbolenza:

$$K_m = c_\mu \frac{E^2}{\epsilon}$$

$$K_h = K_q = 1.35 K_m$$

$$K_E = \frac{K_m}{\sigma_E}$$

$$K_\epsilon = \frac{K_m}{\sigma_\epsilon}$$

Dove $c_\mu = 0.09$, $\sigma_E = 1$ e $\sigma_\epsilon = 1.3$. Anche queste sono variabili empiriche che possono richiedere una correzione in condizioni di flussi specifiche.

7.3.4 La radiazione solare

Il bilancio legato radiazione atmosferica è definito dai coefficienti di assorbimento e di emissione dei diversi strati dell'atmosfera. In un modello ad N strati la radiazione entrante ad onde lunghe alla quota z può essere calcolata come:

$$Q_{lw}^{\downarrow} = \sum_{n=1}^N \sigma T^4(n) [\epsilon_n(m + \Delta m) - \epsilon_n(m)]$$

m rappresenta la quantità di vapore acqueo presente tra la quota z e il limite inferiore dello strato n , $m + \Delta m$ la quantità di vapore acqueo presenta tra la quota z e il limite superiore dello strato n . ϵ_n indica l'emissività, T la temperatura assoluta dello strato n . La radiazione solare ad onde corte entrante nello strato superiore del modello viene calcolato integrando l'intensità radiativa del sole I_0 tra le lunghezze d'onda $\lambda = 0.29\mu m$ e $\lambda = 4.0\mu m$.

$$Q_{sw}^* = \int_{0.29}^{4.0} I_0 \exp\{-\alpha_R(\lambda)m + \alpha_M(\lambda)m\} d\lambda$$

La massa d'aria ottica m dipende dall'altezza del sole h :

$$m = \begin{cases} \frac{1}{\sin h} & \text{se } h > 10 \\ 1.22 \left(\frac{1.0144}{\sin(h + 1.44)} - 0.49 \right) & \text{se } h \leq 10 \end{cases}$$

$\alpha_R(\lambda) = 0.00816 \cdot \lambda^{-4}$ e $\alpha_M(\lambda) = \lambda^{-1.3} \beta_{tr}$ rappresentano i coefficienti di dispersione di Rayleigh e di Mie, con $0.004 \leq \beta_{tr} < 1$ come coefficiente di opacità.

All'interno del modello i flussi radiativi sono influenzati fortemente dalla presenza di edifici, che creano un conseguente effetto di ombreggiamento. Le modifiche che questo implica sulla radiazione ad onde corte e lunghe è modellato tramite una serie di $\sigma_{...}$ che variano da 0 (se il flusso radiativo è completamente ostacolato) a 1 (se il flusso rimane indisturbato).

Lo sky view factor rappresenta la porzione di cielo visibile dal centro di una cella della griglia:

$$\sigma_{svf} = \frac{1}{360} \sum_{\pi=0}^{360} \cos \omega(\pi)$$

Dove ω indica l'angolazione massima visibile in direzione π .

7.3.5 Il modello del suolo

Il modello del suolo calcola la temperatura e l'umidità concernenti il suolo fino a una profondità di 1.75 m. Per valori di profondità superiori le variazioni diurne di temperatura e di umidità possono considerarsi trascurabili per l'atmosfera.

Ogni cella della griglia possiede un profilo relativo al suolo costituito da 14 strati che differiscono in profondità. Infatti lo spessore di ogni singolo strato aumenta dalla base verso la sommità: mentre gli strati superiori sono alti solo 1 cm, quelli inferiori sono alti 50 cm.

Il modello del suolo è di tipo 1d, ovvero vengono calcolati solo i flussi d'umidità e di temperatura verticali. La temperatura del suolo T_s ed il contenuto volumico d'acqua η sono calcolati come segue:

$$\frac{\partial T_s}{\partial t} = \kappa_s \left(\frac{\partial^2 T_s}{\partial z^2} \right)$$
$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = D_\eta \left(\frac{\partial^2 \eta}{\partial z^2} \right) + \frac{\partial K_\eta}{\partial z} - S_\eta(z)$$

La diffusività termica κ_s è una costante per i suoli impermeabili e una funzione dell'umidità del suolo η per tutti gli altri tipi di suolo.

7.3.6 La vegetazione

All'interno di ENVI-met la vegetazione interagisce con il modello atmosferico, con quello del suolo e quello della radiazione solare.

Il flusso termico diretto $J_{f,h}$, quello di evaporazione $J_{f,evap}$ e quello relativo alla traspirazione $J_{f,trans}$ che definiscono le interazioni tra la vegetazione e l'atmosfera possono essere scritte come:

$$J_{f,h} = 1.1r_a^{-1}(T_f - T_a)$$
$$J_{f,evap} = r_a^{-1}\Delta q\delta_c f_w + r_a^{-1}(1 - \delta_c)\Delta q$$
$$J_{f,trans} = \delta_c(r_a + r_s)^{-1}(1 - f_w)\Delta q$$

Dove T_a rappresenta la temperatura dell'aria, T_f la temperatura del fogliame, q_a l'umidità specifica dell'aria e $\Delta q = q^*T_a - q_a$. q^* rappresenta il valore saturo di q sulla superficie della foglia. δ_c definisce se l'evapotraspirazione è possibile ($\delta_c = 1$) oppure no ($\delta_c = 0$). r_a indica la resistenza aerodinamica, che si esprime in funzione del diametro della foglia D e della velocità del vento W :

$$r_a = A \sqrt{\frac{D}{W}}$$

Il parametro A dipende dal tipo di pianta: per le conifere $A = 87s^{0.5}m^{-1}$, per l'erba e per le piante decidue $A = 200s^{0.5}m^{-1}$. D rappresenta il diametro medio della foglia.

Il fattore più importante nel calcolo dell'evapotraspirazione delle piante sono i cosiddetti stomi, delle piccole aperture all'interno delle foglie che consentono lo scambio di gas tra l'aria e la foglia. La resistenza stomatale r_s è quindi indice di quanto gli stomi sono aperti.

7.4 Simulazione relativa all'area del Lazzaretto

A Bologna sono presenti 3500 tetti piani per una superficie totale pari ad 82 Ha (57). Tra tutte le aree possibili è stata scelta come oggetto della simulazione l'area del Lazzaretto, non solo a causa della presenza del tetto verde oggetto di studio, ma soprattutto in quanto area pilota selezionata dall'Alma Mater Studiorum all'interno del Piano della Sostenibilità ambientale.

Lo studio si pone l'obiettivo di valutare i cambiamenti dal punto di vista termico e di benessere di tre diversi scenari:

- 1) Il primo identificante lo stato di fatto;
- 2) Il secondo in qualità di scenario ipotetico in cui le coperture fossero tutte rivestite da Sedum;
- 3) Il terzo ipotizzando invece la presenza estesa del tappeto Native

in primis durante la giornata estiva più calda (ovvero con temperatura media maggiore), poi durante un comune giorno del mese di Ottobre.

7.4.1 Scenario 1: lo stato attuale in data 19/07/14

7.4.1.1 L'Area Input File

Per ricreare l'area da simulare si è utilizzato come modello di base la vista aerea fornita da Bing (Figura 7.10) e la si è ricalcata all'interno di ENVI-met (Figura 7.11).

Nello specifico l'area si estende per 300 m lungo l'asse x e per 350 m lungo l'asse y, ma è stata importata in scala 1:200.

Se l'asse x e l'asse y sono stati scalati di un fattore pari a due, per l'asse z il fattore è stato posto pari a 1.50 per poter differenziare più coerentemente le altezze degli edifici. Il dominio quindi si presenta definito come dalla Figura 7.12.

Si è scelto questo livello di dettaglio come compromesso tra la capacità di tracciare piccoli dettagli fondamentali, come le quattro aree verdi in copertura, e la velocità computazionale del programma, che ovviamente diminuisce per modelli meno estesi.

L'area è inoltre stata ruotata rispetto al Nord di 37° in senso antiorario.



Figura 7.10: cartografia dell'area di studio del Lazzaretto (Bologna) estratta da Bing



Figura 7.11: riproduzione dell'area di studio tramite ENVI-met

Change or create model Domain

Number of grids and nesting properties
Main model area:
x-Grids: 150 y-Grids: 175 z-Grids: 30

Nesting grids around main area:
Nr of nesting grids: 5
Soil profile ID for nesting grids
Soil A: s <Asphalt Road>
Soil B: s <Asphalt Road>

Grid size and structure in main area
Size of grid cell in meter:
dx= 2.00 dy= 2.00 dz= 1.50 (base height)

Method of vertical grid generation:
 equidistant (all dz are equal except lowest grid box)
 telescoping (dz increases with height)
Telescoping factor (%): 0
Start telescoping after height (m): 0.00

Model area description: A brave new area

Geographic Properties
Model rotation out of grid north: 37.00
Location on earth
Name of location: bologna/Italy
Position on earth: Latitude (deg. +N, -S): 44.51
Longitude (deg. -W, +E): 11.35
Reference time zone: Name: CET/GMT+1
Reference longitude: 15.00

Georeference
Co-ordinate of lower right grid x-value: 0.00
y-value: 0.00
Reference system: <plane>

Create new area
Apply changes
Cancel

Figura 7.12: dominio definito all'interno della finestra ENVI-Eddi.

La parte a cui si è prestata più attenzione è quella dell'inserimento del verde. Nello specifico, in questo caso è stato necessario integrare il database con la vegetazione che rappresentasse il tappeto di *Sedum* e quello autoctono.

Il database PLANT.DAT si presenta come un file di testo in cui ogni riga rappresenta una determinata pianta, i cui valori specifici sono indicati per colonne.

Nel dettaglio queste comprendono:

- 1) ID, ovvero due lettere che identifichino la pianta all'interno dell'elenco delle piante disponibili. Bisogna prestare attenzione in quanto il software è sensibile all'uso delle maiuscole, quindi 'dm' e 'DM' rappresentano due piante differenti.
- 2) C? definisce il tipo di pianta in funzione del fissaggio della CO₂. Bisogna specificare se si tratta di una C3, come nella maggior parte dei casi, oppure di una C4, come ad esempio per il mais.
- 3) TY indica il tipo di pianta, specificando se si tratta di un albero deciduo con il codice 01, di conifere con lo 02 o di erba con lo 03. Questa informazione viene utilizzata per calcolare il diametro della foglia e le proprietà aerodinamiche.
- 4) Rs_min rappresenta la resistenza stomatale minima della pianta, espressa in s/m. Viene consigliato di lasciare un 400 per gli alberi e un 200 per le erbe, a meno che non si disponga di dati dettagliati.
- 5) A_f definisce l'albedo ad onde corte delle foglie della pianta. Normalmente è pari a 0.20 a meno che non si disponga di una pianta particolare.
- 6) HH.HH si riferisce all'altezza della pianta espressa in metri.
- 7) TT.TT indica la profondità dell'apparato radicale espresso in valori positivi.
- 8) LAD1...LAD10 rappresenta la densità fogliare (Leaf Area Density) espressa in m² di superficie fogliare/m³ d'aria, in funzione di dieci punti caratteristici. I profili fogliari sono normalizzati da $z/H = 0.1$ (LAD1) a $z/H = 1$ (LAD10), dove z rappresenta l'altezza esaminata e H quella totale della pianta. Si veda la Figura 7.13 per alcuni esempi.
- 9) RAD1...RAD10 definisce la densità delle radici (Root Area Density) espressa in m² di superficie radicale/m³ d'aria, in funzione di dieci punti caratteristici. Gli apparati radicali sono normalizzati da $z/H = 0.1$ (RAD1) a $z/H = 1$ (RAD10), dove z rappresenta la profondità esaminata e H quella dell'apparato totale della pianta.
- 10) Name definisce il nome con cui si intende identificare la pianta.

Per quanto riguarda il *Sedum* l'articolo redatto da de Munck et al. (58) specifica come esso sia una pianta di tipo C3. Inoltre sempre al suo interno vengono indicati i parametri relativi alla sua minima resistenza stomatale, pari a 150 s/m, ed all'albedo ad onde corte, pari a 0.154.

Per quanto concerne l'altezza del *Sedum* si è impostato 5 cm in quanto, nonostante si tratti di un mix di diverse specie, sono tutte di dimensioni paragonabili; mentre per l'apparato radicale si assume che esso possa estendersi per l'intera altezza del substrato ed è quindi stato posto uguale a 10 cm.

Per definire l'LAD si è fatto riferimento agli atti dell'ultimo convegno del World Sustainable Building tenutosi a Barcellona (59). Al loro interno viene specificato che la Leaf Area Density possa essere ritenuta costante e pari a 1.50.

Purtroppo non è stato possibile reperire in letteratura informazioni relative all'RAD; per queste ragioni tale parametro è stato lasciato invariato rispetto alle altre piante già presenti all'interno del programma.

Per quanto concerne in Native, invece, trattandosi di erbacee appartenenti alla famiglia dei mesobrometi, anche in questo caso è stato indicato con la sigla C3.

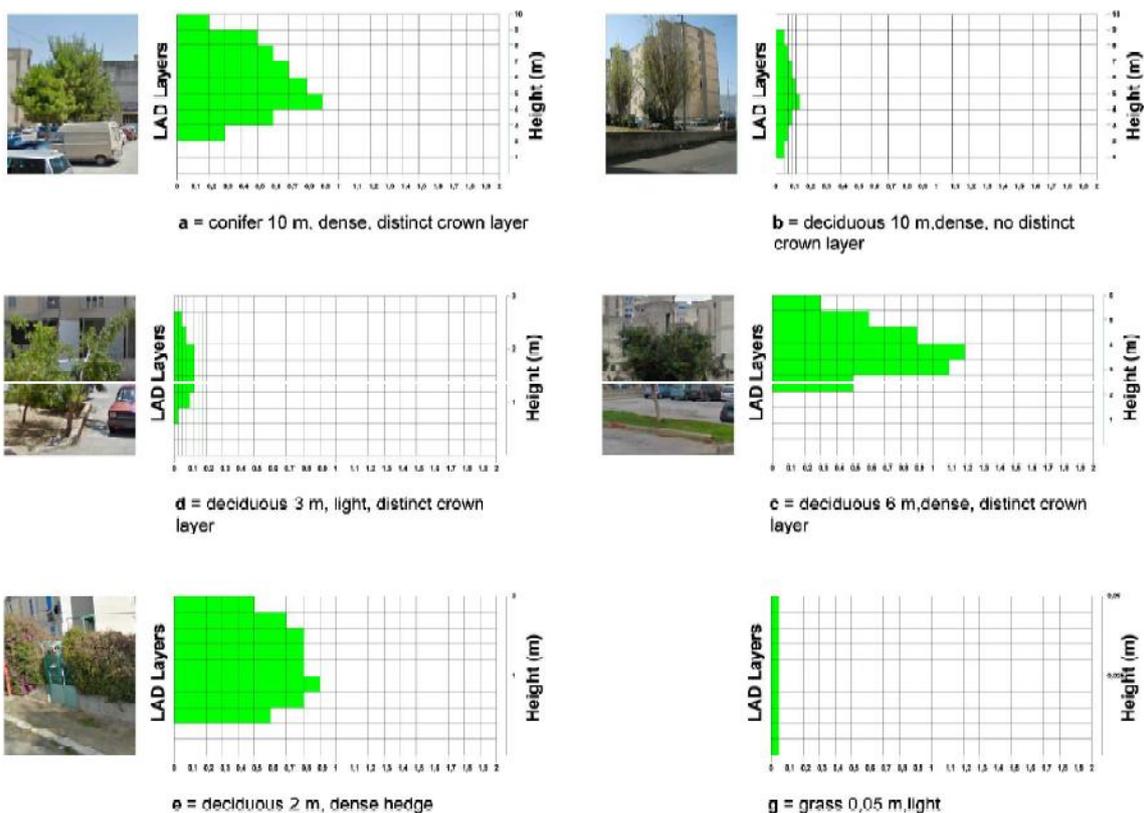


Figura 7.13: esempi di LAD (Leaf Area Density) per diverse piante (60)

Sempre nell'articolo redatto da de Munck et al. (58) è specificato come un manto erboso composto da Graminacee abbia una resistenza stomatale minima pari a 40 s/m ed un albedo ad onde corte pari a 0.10.

Per quanto concerne l'altezza del Native, essa si è impostata pari a 50 cm; mentre per l'apparato radicale si assume che esso possa estendersi per l'intera altezza del substrato ed è quindi stato posto uguale a 8, 10 e 12 cm in funzione della porzione di tetto in questione.

Per definire l'LAD anche in questo caso si è fatto riferimento agli atti dell'ultimo convegno del World Sustainable Building (59), all'interno dei quali è specificato che la Leaf Area Density possa essere ritenuta costante e pari a 0.30.

Purtroppo non è stato possibile reperire in letteratura informazioni relative all'RAD; per queste ragioni tale parametro è stato lasciato invariato rispetto alle altre piante già presenti all'interno del programma.

In Tabella 7.2 è possibile trovare riassunti i parametri riguardanti le piante appena descritte.

Sono stati inoltre inseriti dei punti, detti ricettori, in corrispondenza del RR, del GR, del Native e della stazione Hobo per cui il programma calcola nel dettaglio tutte le variabili in output ogni 30 minuti di simulazione. In questo modo ci si pone l'obiettivo di confrontare i risultati della simulazione con i dati tecnici frutto della strumentazione in sito.

	Sedum	Native 1	Native 2	Native 3
ID	aa	bb	cc	dd
C?	C3	C3	C3	C3
TY	03	03	03	03
Rs_min	150	40	40	40
A_f	0.154	0.10	0.10	0.10
HH.HH	0.05	0.50	0.50	0.50
TT.TT	0.10	0.08	0.10	0.12
LAD1...LAD10	1.500	0.300	0.300	0.300
RAD1...RAD10	0.100	0.100	0.100	0.100

Tabella 7.2: parametri relativi alle piante aggiunte al database PLANT.DAT di Envi-met.

L'Area Input File si presenta quindi come da Figura 7.14.

7.4.1.2 Il Configuration File

Le prime tre simulazioni sono state condotte durante il giorno più caldo registrato dalla stazione Hobo durante l'anno 2014. Nello specifico è stata scelta la giornata con temperatura ambientale media maggiore, ovvero il 19 Luglio.

Si è scelto di far partire la simulazione attorno alla mezzanotte come consigliato dagli autori di Envi-met; nello specifico sono state scelte le ore 00:20 in quanto per tale orario si registrava il primo vento della giornata ed il programma non ammette come condizione iniziale quella di vento assente.

Si è optato per far durare la simulazione solo 18 ore e non 24 a causa dei lunghi tempi computazionali. In questo modo è comunque possibile apprezzare i risultati relativi alle ore centrali del giorno, ovvero quelle più calde.

Per tutti i dati ambientali si è fatto riferimento alla strumentazione allocata sul tetto descritta nel capitolo 6.2.

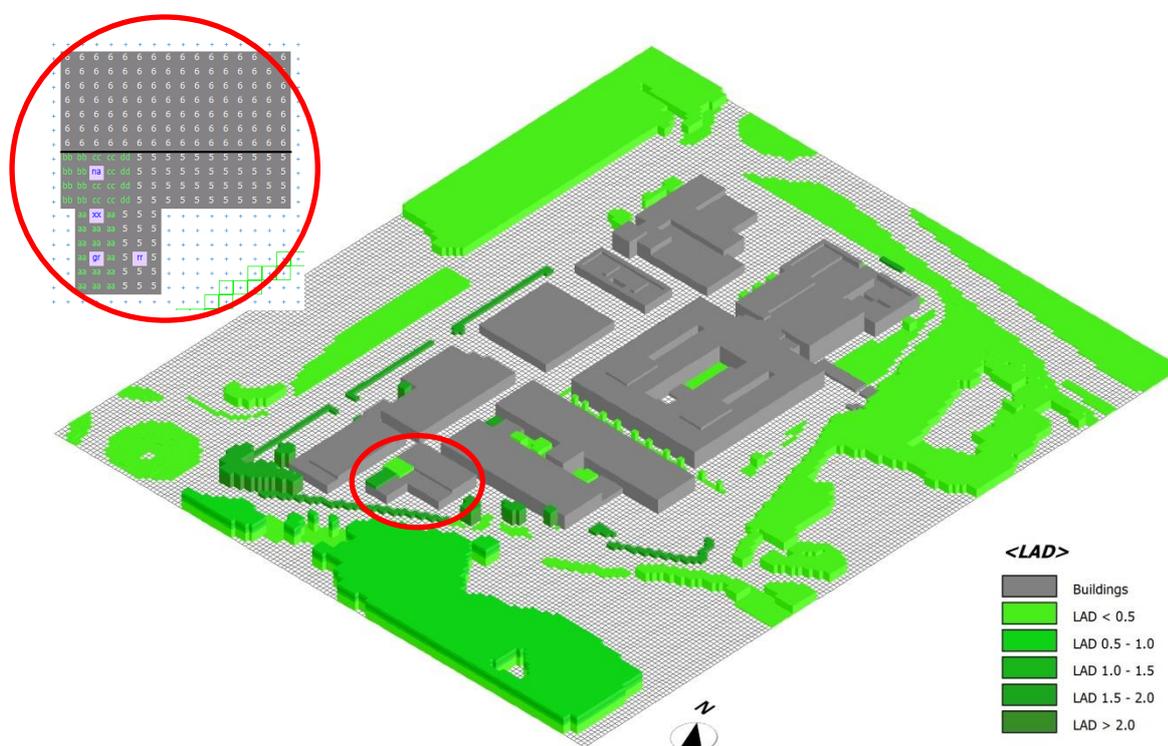


Figura 7.14: visualizzazione tridimensionale dell'Area Input File effettuata tramite Leonardo 2014. All'interno dello zoom, sottolineato dal cerchio rosso, sono stati evidenziati i punti ricettori corrispondenti alle tre tipologie di copertura in esame (identificati con le sigle gr, rr e na) ed alla stazione Hobo (identificata da xx).

Nota la velocità del vento ad 8.18 m dal suolo, ovvero nel punto in cui è innestato l'anemometro, la si è convertita nella velocità richiesta come input dal programma tramite il Wind Profile Calculator (61). Questo programma consente, note la scabrezza del suolo e la velocità del vento a una determinata quota, di tracciare il profilo del vento in funzione dell'altezza dal suolo (Figura 7.15).

Per quanto riguarda la direzione di provenienza dello stesso, si ricorda che la mappa è stata ruotata di 37° in senso antiorario. Di conseguenza nonostante la stazione alle 00:20 registrasse del vento proveniente da 274°, in input andrà inserito un valore pari a $274^\circ - 37^\circ = 237^\circ$.

Siccome viene richiesto di inserire la scabrezza relativa a 10 m dal suolo, trattandosi di aria, tale valore sarà pari a 0.1.

All'ora d'inizio della simulazione il data logger segnava 24.32°C.

Siccome alcuni assumono la perdita di 1°C ogni 100 m d'altezza (62), ma c'è anche chi definisce un gradiente termico verticale di circa 6.5° ogni 1000 metri di quota (63), si opta per una media tra questi due valori per cui la temperatura a 2500 m sarà:

$$T(2500 \text{ m}) = 24.32^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C} = 4.32^\circ\text{C}.$$

Per il calcolo della temperatura potenziale, oltre alla temperatura appena indicata, è

Please specify parameters

height above ground	<input type="text" value="8.18"/> m	
wind speed	<input type="text" value="0.3"/> m/s	
roughness length z_0 (see table below)	<input type="text" value="0.5"/> m	<input type="button" value="Refresh"/>

Result

height above ground	wind speed
150 m	0.61 m/s
140 m	0.60 m/s
130 m	0.60 m/s
120 m	0.59 m/s
110 m	0.58 m/s
100 m	0.57 m/s
90 m	0.56 m/s
80 m	0.54 m/s
70 m	0.53 m/s
60 m	0.51 m/s
50 m	0.49 m/s
40 m	0.47 m/s
30 m	0.44 m/s
20 m	0.40 m/s
10 m	0.32 m/s

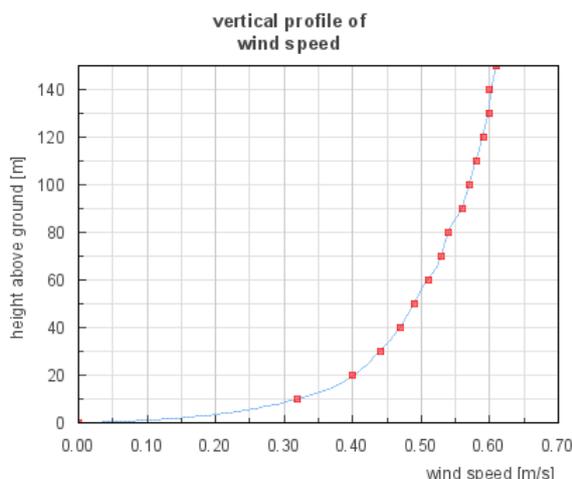


Figura 7.15: calcolo del profilo del vento in funzione dell'altezza dal suolo, necessario per determinare la sua velocità a 10 m (61)

necessario desumere anche la pressione $p(2500\text{ m})$. Nello specifico essa equivale a 709 mbar.

Tramite i valori appena riportati, è possibile dedurre la temperatura potenziale, $TP(2500\text{ m})$, richiesta tra gli input del programma: $TP(2500\text{ m}) = 306.15\text{ K}$.

Grazie al diagramma riportato in Figura 7.16 si è dedotta l'umidità specifica a 2500 m in funzione della temperatura $T(2500\text{ m})$ (62).

Per quanto concerne l'umidità relativa a 2 m, invece, siccome la stazione Hobo è posta a circa la medesima distanza dal tetto verde, si suppone che il valore registrato dalla sua sonda corrisponda ad un eventuale valore a livello del terreno.

Il Configuration File è stato poi arricchito con le sezioni [SOILDATA] e [BUILDING] per rendere ancora più verosimile la simulazione.

La prima sezione permette di indicare la temperatura e l'umidità specifica relativa a tre fasce all'interno del suolo.

Per quanto riguarda la temperatura della prima fascia (0-20 cm), si è fatto riferimento ai dati scaricati dalla sonda FT-90 posta nel GR ad una profondità pari a 10 cm. Alle 00:20 del 19/07/14 essa indicava una temperatura di 31.3°C , pari a circa 305 K.

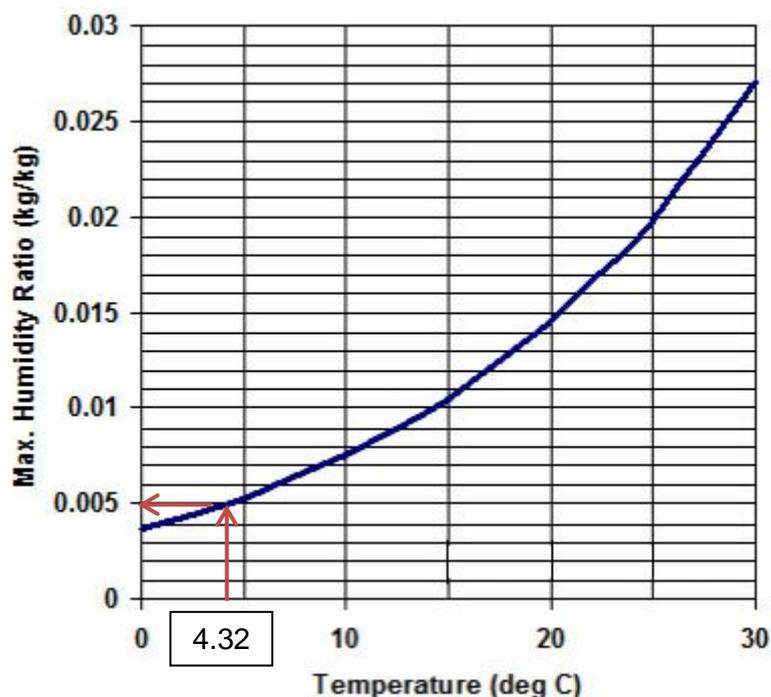


Figura 7.16: diagramma che lega la temperatura ($^\circ\text{C}$) alla massima umidità relativa (kg_a/kg_w) (62)

Per quanto concerne le due fasce più profonde, non disponendo di parametri per la loro determinazione, si è riproposto il valore della prima, così come veniva fatto nella sezione allo stato di default.

L'umidità relativa è invece stata determinata grazie al parametro *Soil Moisture* evidenziato dalla stazione Hobo. Esso indicava un valore pari al 33.1% a circa 5 cm di profondità ed è pertanto stato assegnato alla prima fascia. Per le altre due si è aggiunto il 10% di umidità, così come veniva effettuato nella sezione allo stato di default.

La seconda sezione, ovvero [BUILDING], è quella che differenzia sostanzialmente i tre scenari simulativi. Infatti all'interno di essa vengono richiesti dei parametri, quali la trasmittanza e l'albedo, che variano sostanzialmente nei tre casi.

Siccome nel lotto sono presenti edifici molto diversi in merito alla destinazione d'uso ed Envi-met consente l'inserimento di un solo parametro per la trasmittanza che verrà poi assegnato indistintamente a tutti, si è scelto di effettuare il calcolo in corrispondenza del Reference Roof. In questo modo ci si pone nella situazione peggiorativa per cui a separare l'interno dall'esterno del LAGIRN sono presenti solo i tegoli in c.a.p. della copertura, la cui soletta misura 10 cm. Pertanto la trasmittanza del tetto sarà pari a 4.5 W/m²K.

Per quanto concerne la trasmittanza delle pareti verticali esterne ci si è posti nella stanza sottostante al RR, dove ci si presenta una parete prefabbricata in cemento armato dello spessore di 20 cm, esternamente lasciata grezza ed internamente intonacata. Pertanto si calcola una trasmittanza pari a 3.5 W/m²K.

Supponendo che tutte le coperture del Lazzaretto siano rivestite da guaina bituminosa, si assegna ad esse un valore di albedo pari a 0.1, mentre per le pareti, essendo per la maggior parte in colore chiaro, si attribuisce un valore pari a 0.5 (64).

Tutti i dati inseriti all'interno del Configuration File sono riassunti in Tabella 7.3.

7.4.1.3 I risultati

Tramite l'ausilio di Leonardo 2014 si sono realizzate delle immagini estrapolando i dati di temperatura computati da ENVI-met durante la simulazione.

Nello specifico in Figura 7.17 si riportano le termografie orarie effettuate a 1.35 m dal suolo.

Si ricorda che Leonardo realizza le planimetrie ad altezze specifiche in funzione della griglia verticale scelta all'interno dell'Area Input File; per questa ragione non è possibile estrapolare sezioni x-y ad ogni quota e si è scelta, tra le tante, l'altezza che più si avvicinasse a quella del pedone.

Si noti come nelle prime sei ore, quelle che in gergo vengono identificate col termine d'inizializzazione, le temperature potenziali appaiono poco variabili in quanto il programma sta effettuando i primi calcoli, ovvero quelli più complessi. Alle 07:20 si verificano i primi cambiamenti veramente percepibili e le temperature continuano ad

Configuration File

Start Simulation at Day (DD.MM.YYYY):	= 19.07.2014
Start Simulation at Time (HH:MM:SS):	= 00:20:00
Total Simulation Time in Hours:	= 18.00
Save Model State each ? min	= 60
Wind Speed in 10 m ab. Ground [m/s]	= 0.32
Wind Direction (0:N..90:E..180:S..270:W..)	=237
Roughness Length z_0 at Reference Point	= 0.1
Initial Temperature Atmosphere [K]	= 306
Specific Humidity in 2500 m [g Water/kg air]	= 5
Relative Humidity in 2m [%]	= 75.8

[SOILDATA]

Initial Temperature Upper Layer (0-20 cm) [K]	= 305
Initial Temperature Middle Layer (20-50 cm) [K]	= 305
Initial Temperature Deep Layer (below 50 cm)[K]	= 305
Relative Humidity Upper Layer (0-20 cm)	= 33.1
Relative Humidity Middle Layer (20-50 cm)	= 43.1
Relative Humidity Deep Layer (below 50 cm)	= 43.1

[BUILDING]

Inside Temperature [K]	= 295
Heat Transmission Walls [W/m ² K]	= 3.5
Heat Transmission Roofs [W/m ² K]	= 4.5
Albedo Walls	= 0.5
Albedo Roofs	= 0.1

Tabella 7.3: valori inseriti all'interno del Configuration File relativo allo scenario attuale in data 19 Luglio 2014.

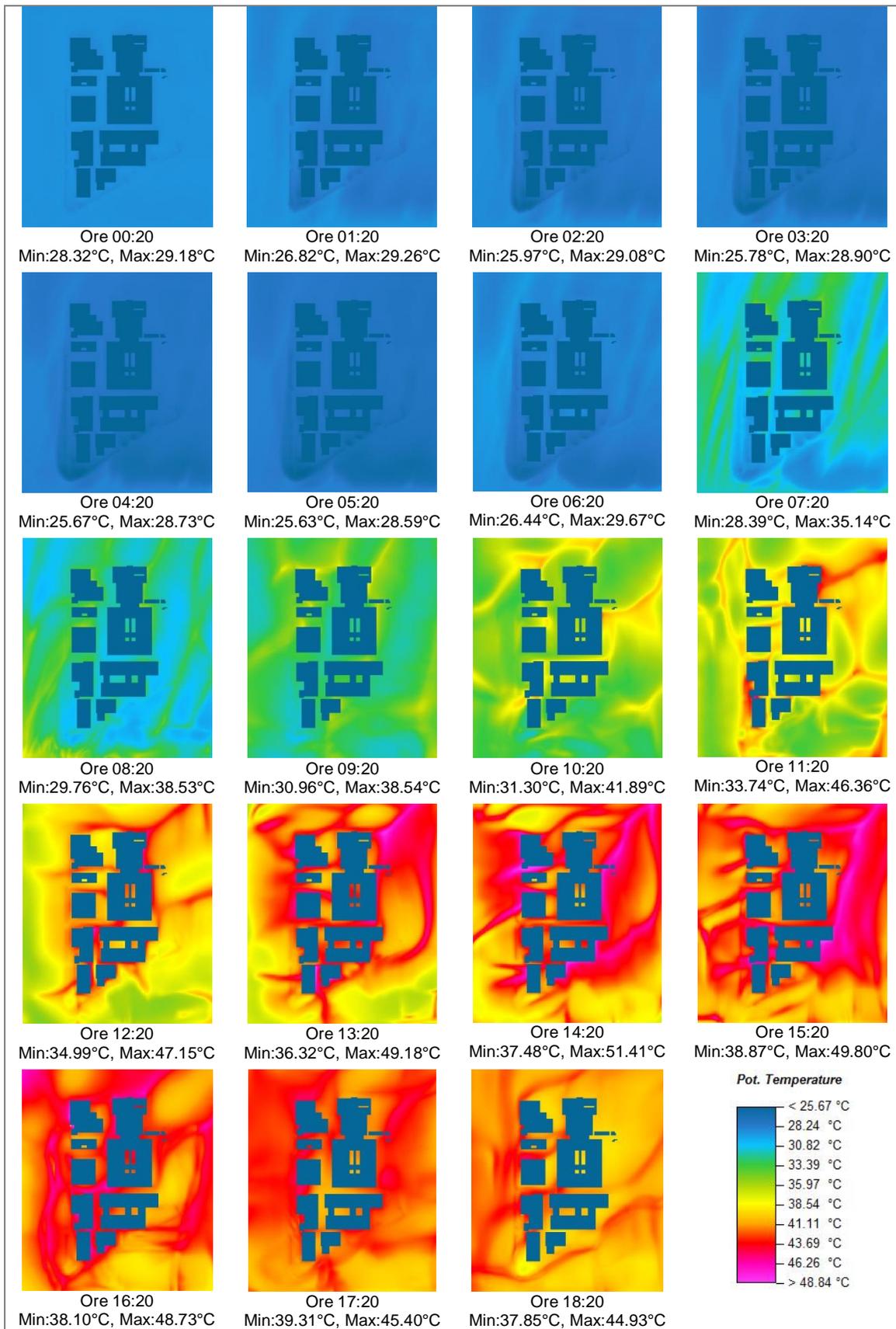
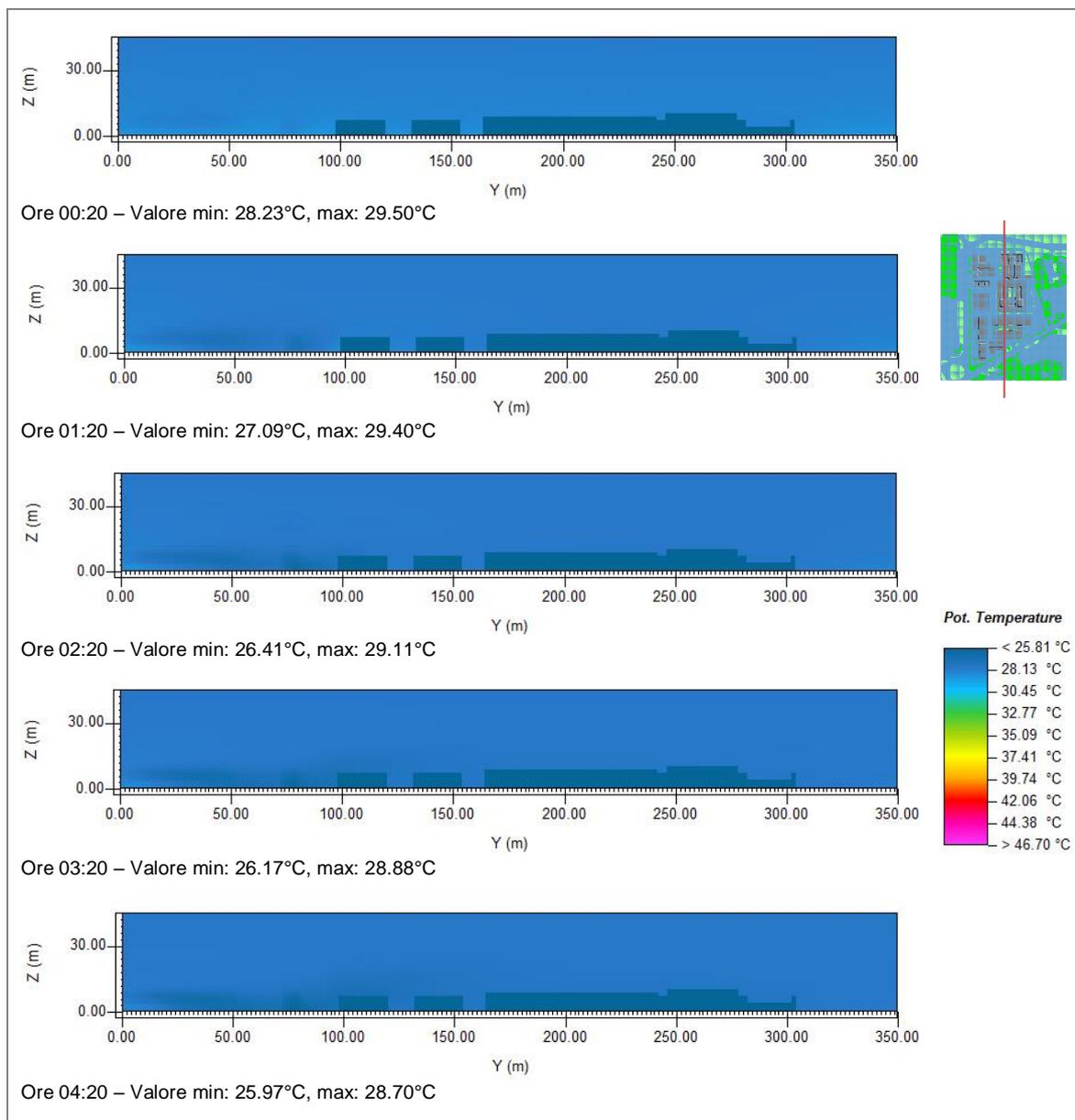


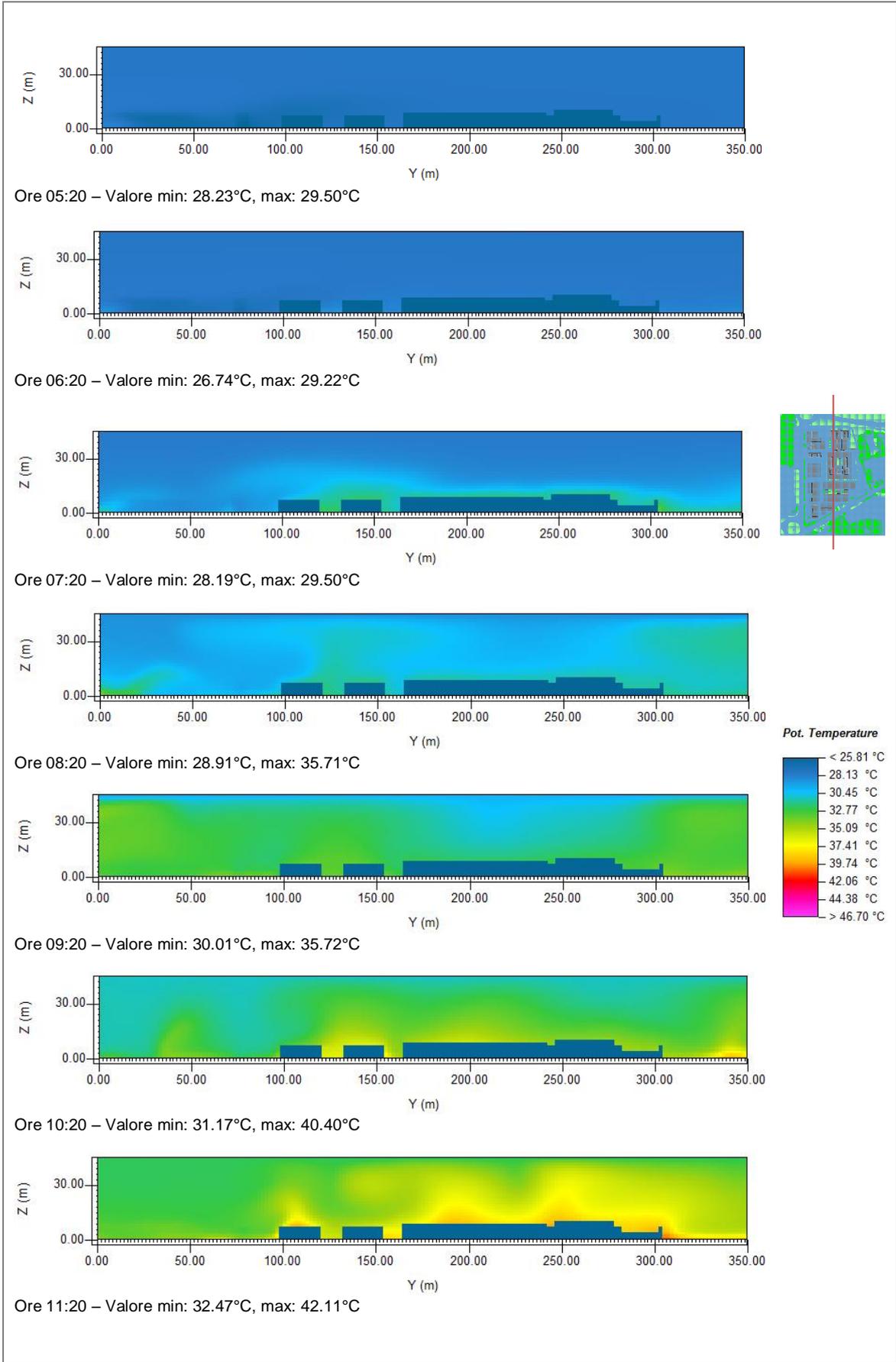
Figura 7.17: rappresentazione oraria della temperatura potenziale relativa alla quota di 1.35 m dal suolo per lo scenario 1 corrispondente allo stato di fatto in data 19/07/14.

aumentare fino a raggiungere i valori massimi in corrispondenza delle 14:20. Alle 18:20 le temperature sono ancora alte, ma sono diminuite di una decina di gradi rispetto le ore centrali.

Per valutare l'effetto isola di calore ci si avvale delle sezioni effettuate in corrispondenza di X = 160 m rappresentate in Figura 7.18.

Dalle immagini si evince come il calore emanato dalla pavimentazione e dalle coperture in guaina bituminosa si elevi fino a circa 30 m dal suolo creando una vera e propria cappa sul lotto. Si noti anche come sottovento rispetto al corpo principale si crei un'area più calda di risacca, così come accade nei canyon tra i corpi sulla sinistra.





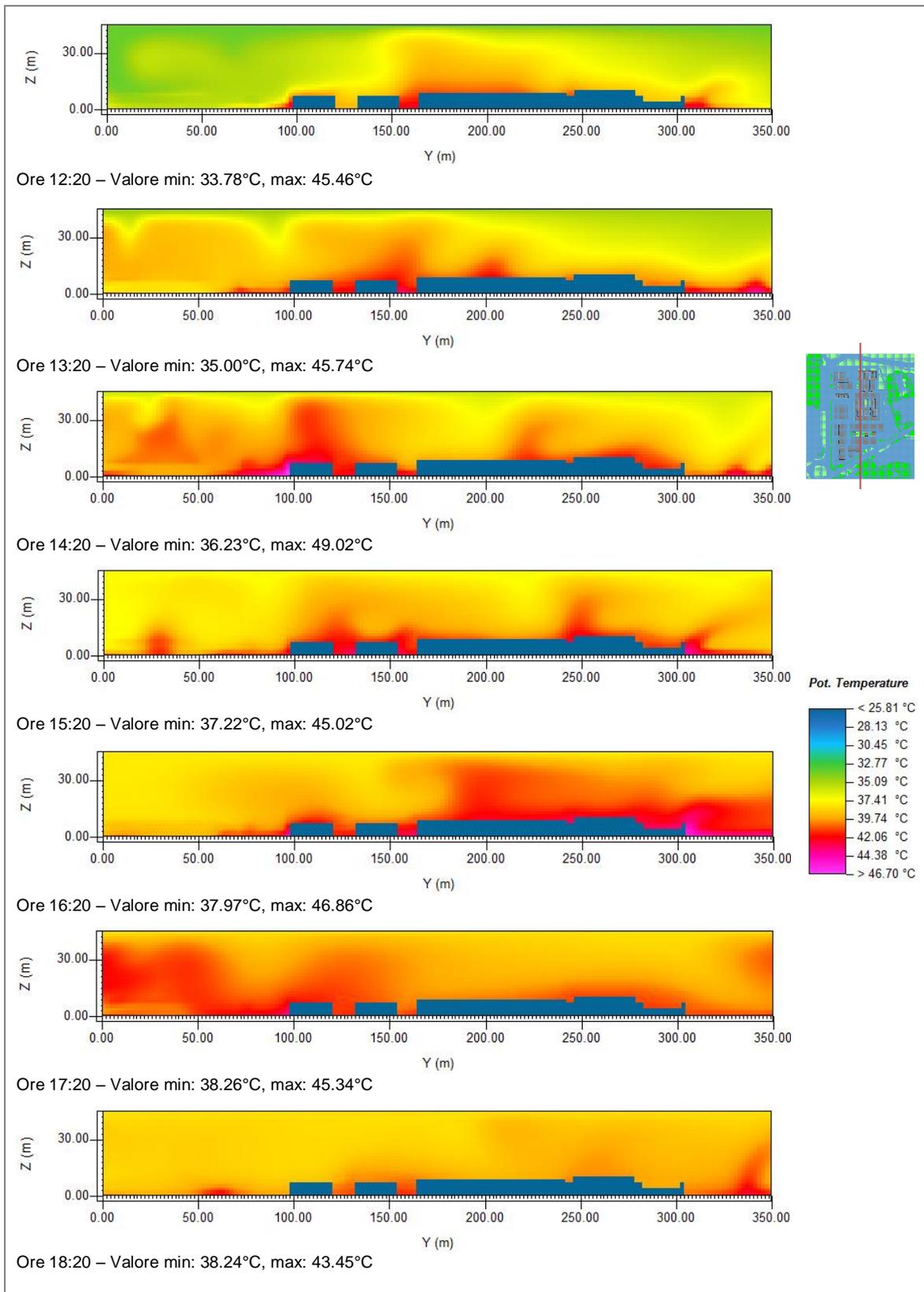


Figura 7.18: rappresentazione oraria della temperatura potenziale relativa alla sezione effettuata in corrispondenza di X (m) = 160 per lo scenario 'stato di fatto'.

Confrontando queste sezioni con quella effettuata in corrispondenza del tetto verde del LAGIRN (Figura 7.19) si nota come la sua presenza sia apprezzabile già nelle prime ore del giorno, durante le quali si mantiene più fresco di 0.5 gradi rispetto il contesto alla medesima quota.

Si faccia attenzione alla differenza nella scala di temperatura tra un'ora e l'altra di quest'ultima sezione. Tale scelta è stata effettuata per consentire di percepire visivamente i gradienti termici in modo più graduale, cosa che non sarebbe stata possibile se si fossero adottati gli intervalli proposti per la sezione ad X = 160 m.

Procedendo con il raffronto tra l'ambiente simulato e quello che viene effettivamente registrato dalla strumentazione presente sul tetto, è stato possibile notare come la

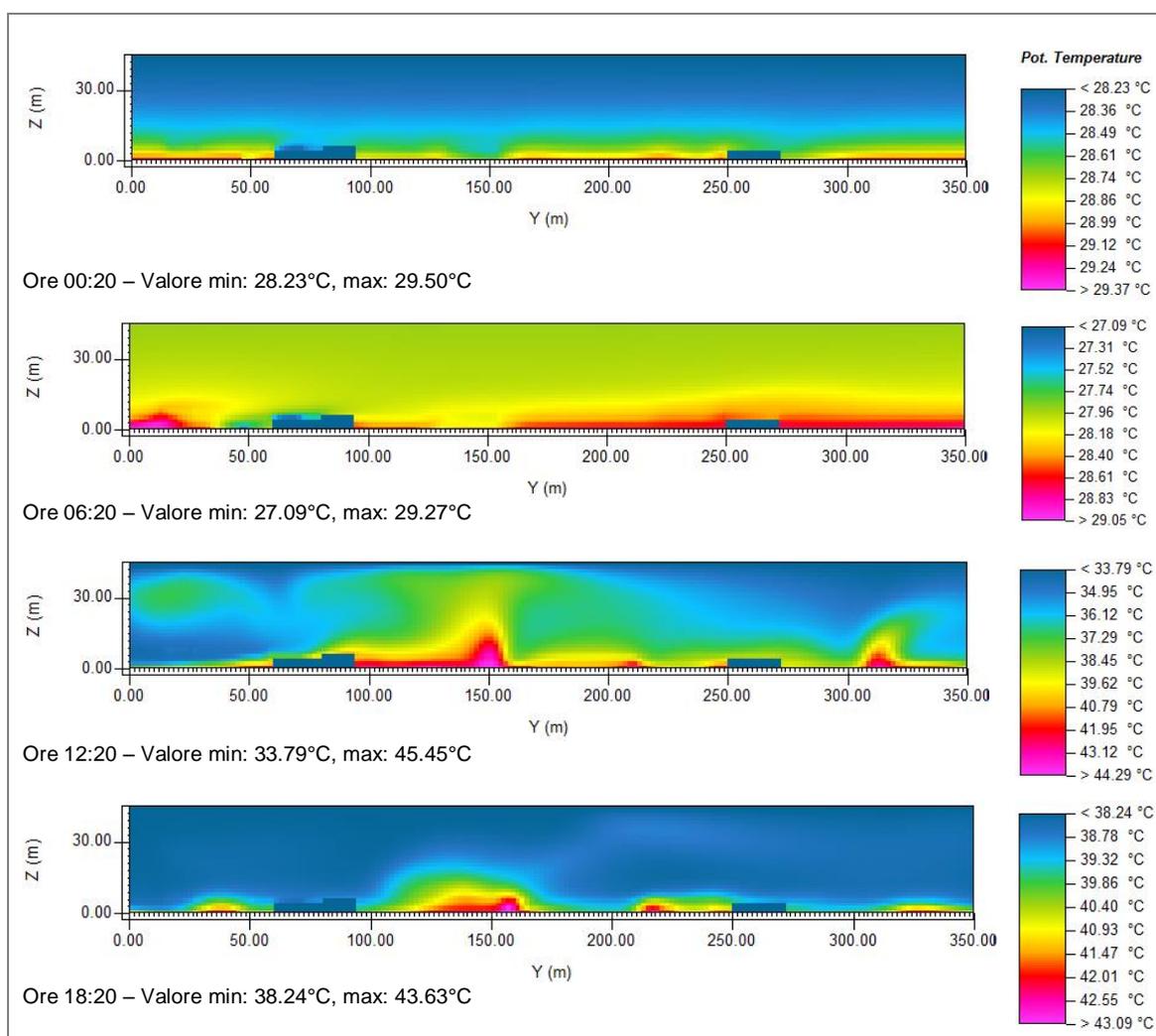


Figura 7.19: rappresentazione della temperatura potenziale relativa alla sezione effettuata in corrispondenza di X (m) = 120 per lo stato di fatto. Si presti attenzione alla variazione dei valori riportati in legenda sulla sinistra da un'ora all'altra.

temperatura potenziale reale si discostasse da quella frutto di ENVI-met (Figura 7.20). Se fino alle prime sei ore simulate si verificano differenze anche di 7°C, con l'avanzare della simulazione la discrepanza con la realtà viene colmata.

Valutando il coefficiente di determinazione tra la temperatura potenziale reale e quella simulata, esso risulta pari a 0.703, quindi l'indice di correlazione di Pearson tra le due variabili è pari a 0.839 (Figura 7.21). Questo ci consente di affermare che, nonostante le differenze iniziali, la simulazione ha effettivamente descritto correttamente l'andamento delle temperature in data 19 Luglio.

Se invece si confrontano i risultati della simulazione con i dati medi orari relativi alla settimana di luglio incentrata nel 19/07/14 (Figura 7.22) si può notare come i dati che ENVI-met fornisce in output si discostino ancora maggiormente. Siccome ENVI-met ragiona per giornate medie, l'aver scelto il giorno più caldo d'estate come momento da simulare lo porta a sovrastimare la temperatura potenziale del sito.

Per quanto concerne i tre ricettori disposti in corrispondenza del Reference, del Native e del Green Roof, tramite il grafico di Figura 7.23 è possibile notare come in realtà ENVI-met faccia fatica a differenziare le tre zone, probabilmente a causa della vicinanza dell'una alle altre e a causa della loro piccola dimensione rapportata a quella del lotto.

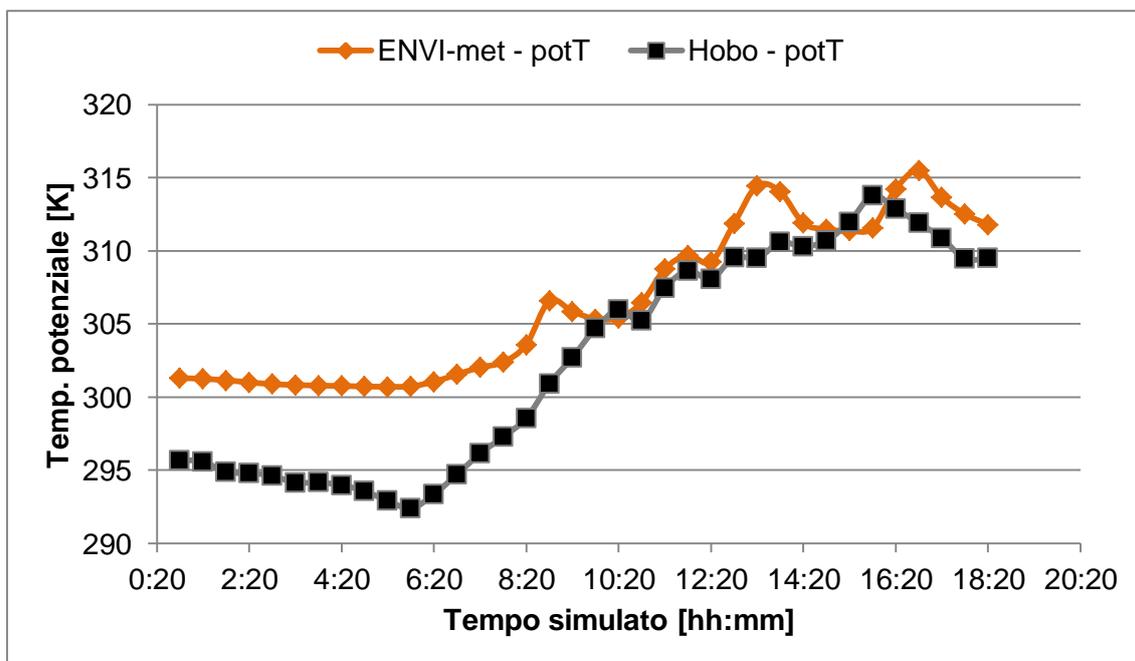


Figura 7.20: confronto tra la temperatura potenziale simulata da ENVI-met e quella reale registrata dalla stazione Hobo in data 19/07/14.

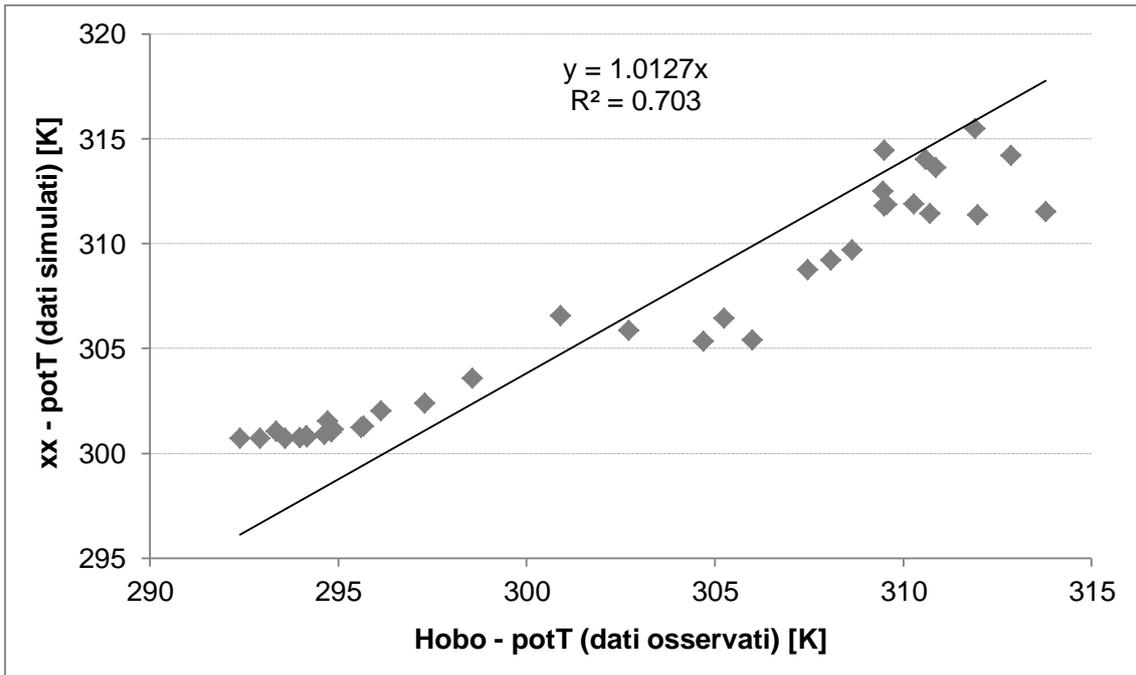


Figura 7.21: correlazione tra la temperatura potenziale osservata dalla stazione Hobo e quella simulata da ENVI-met

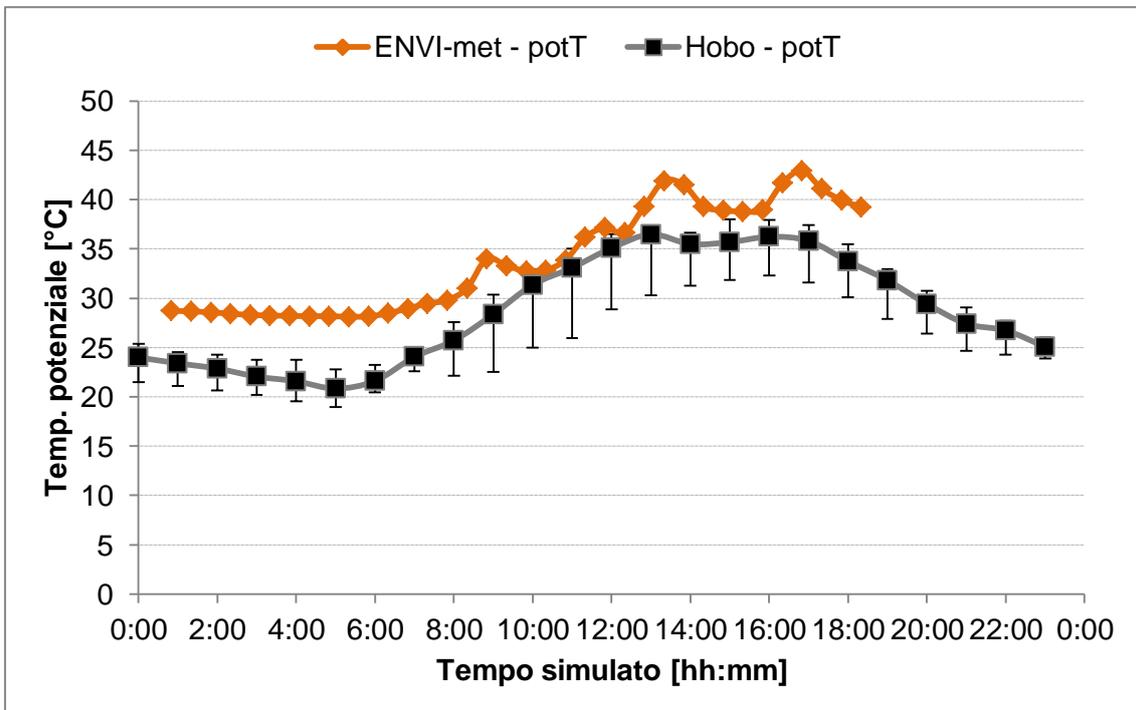


Figura 7.22: confronto tra la temperatura potenziale simulata da ENVI-met e quella reale registrata nella settimana incentrata nel 19 Luglio dalla stazione Hobo. Le barre d'errore rappresentano il primo ed il terzo quartile, il valore centrale la mediana.

Nonostante la guaina bituminosa sia sempre più calda del GR (in media di 0.28°C), questo valore non rappresenta neanche lentamente le differenze reali tra le due coperture. Inoltre il Native che dalle misurazioni tramite termocoppie risulta sempre più fresco del Sedum, in questo caso si rivela essere la tipologia di copertura per cui si raggiungono i picchi di temperatura maggiori. Nonostante ciò, dalle 04:20 in poi il Sedum si dimostra essere più caldo del Native di 0.73°C in media, avvicinandosi maggiormente ai dati rilevati direttamente sul campo.

7.4.2 Scenario 2: tetti verdi a Sedum in data 19/07/14

7.4.2.1 L'Area Input File

Per creare l'Area Input File relativo a questo secondo scenario è stato sufficiente disporre su tutte le coperture la tipologia di vegetazione definita in precedenza all'interno del file PLANT.DAT corrispondente al Sedum. In questo modo il file .ai apparirà come da Figura 7.24.

7.4.2.2 Il Configuration File

A differenziare questo scenario da quello precedente sono sostanzialmente due

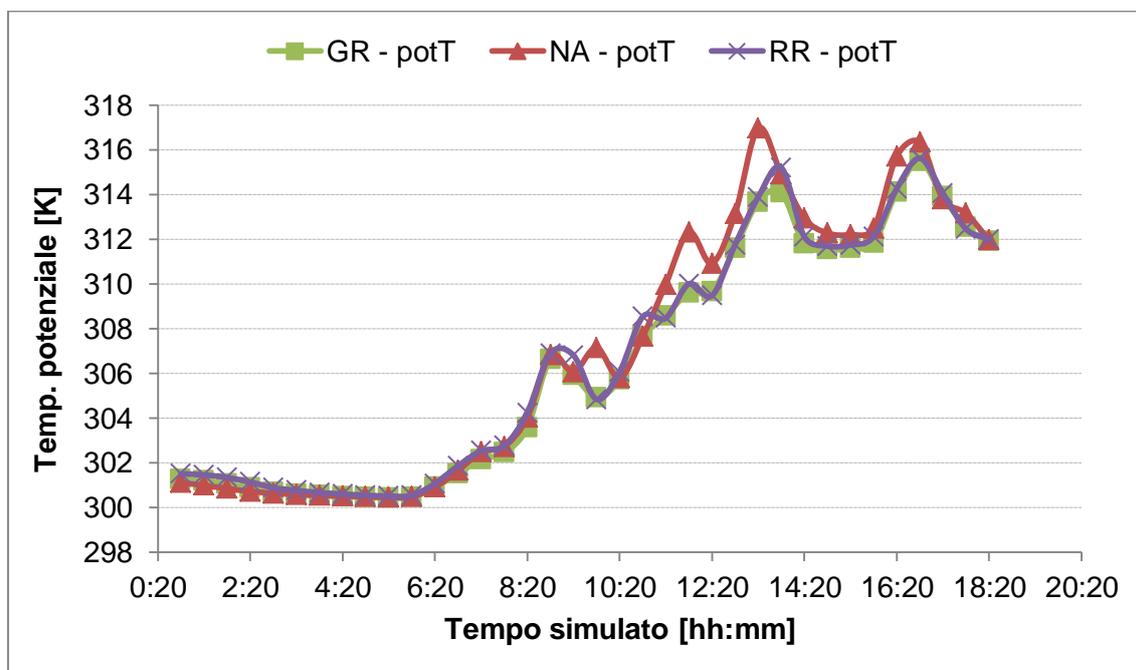


Figura 7.23: andamento della temperatura potenziale registrata in corrispondenza del Reference, del Native e del Green Roof tramite l'ausilio di tre punti ricettori in data 19/07/14.

parametri, ovvero la trasmittanza delle coperture ed il rispettivo albedo.

Per il calcolo della trasmittanza del pacchetto 'tetto verde' si è interpellato direttamente il produttore. La Harpo ha infatti condotto alcuni test in termoflussimetro per definire la resistenza termica del solo substrato, i cui risultati sono indicati in Tabella 7.4 (65).

Siccome per lo spessore del substrato presente sul tetto verde oggetto di studio non sono stati condotti ancora esperimenti, si sono mediati i due valori relativi al 22% di contenuto idrico, ottenendo così una resistenza pari a 0.34 (m²K)/W.

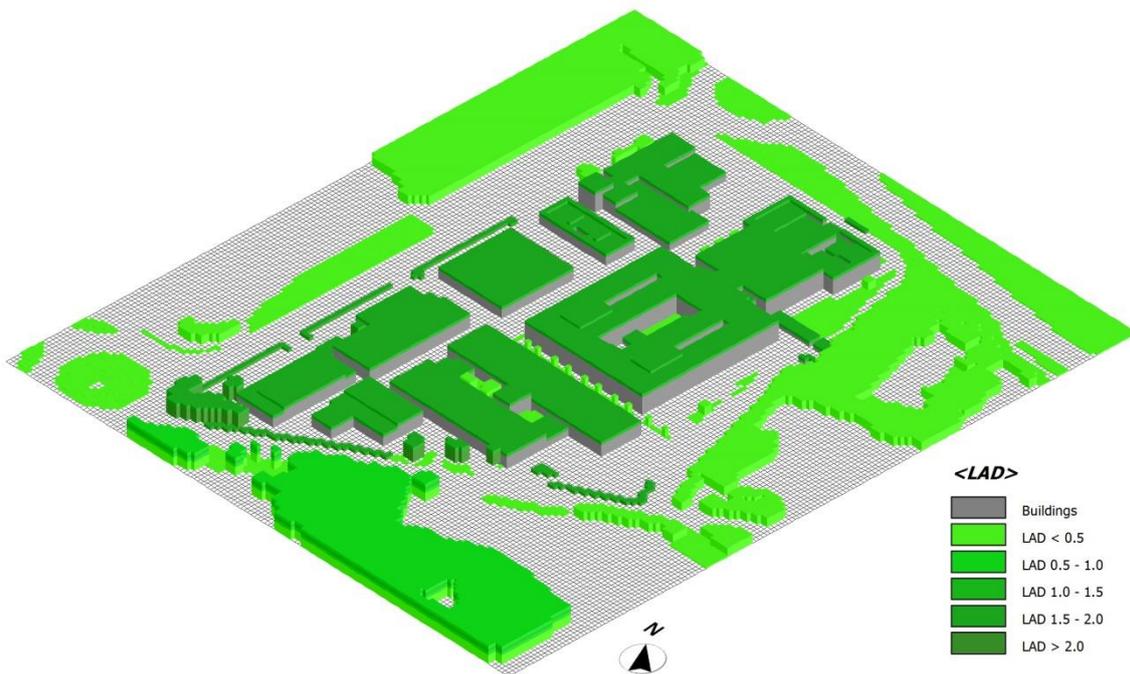


Figura 7.24: visualizzazione tridimensionale dell'Area Input File effettuata tramite Leonardo 2014 relativa allo scenario 2.

Substrato estensivo SEIC Spessore 8 cm a compattazione avvenuta			Substrato estensivo SEIC Sp. 12 cm a compattazione avvenuta		
Contenuto idrico (%)		Resistenza termica (m ² *K)/W	Contenuto idrico (%)		Resistenza termica (m ² *K)/W
0 (secco)		0.45	0 (secco)		0.64
22 (linee guida ISPRA)		0.28	22 (linee guida ISPRA)		0.40
35 (saturo)		0.23	35 (saturo)		0.33

Tabella 7.4: valori registrati in seguito a test in termoflussimetro effettuati dalla Harpo relativi al substrato estensivo SEIC (65)

Per il calcolo completo della trasmittanza si ritiene che, così come suggerito dai produttori, la maggior parte degli strati del pacchetto siano trascurabili in quanto il loro spessore è veramente esiguo. L'unico altro elemento da prendere in considerazione è l'elemento drenante: lo spessore del materiale è di una frazione di millimetro, ma permette di individuare uno strato d'aria spesso circa 2.5 cm che si può assimilare ad uno strato d'aria in quiete.

Per il calcolo dettagliato della trasmittanza si rimanda alla Tabella 7.5.

Si assegna alle coperture un valore di albedo pari a 0.2, corrispondente ad una superficie verde (66).

Per la trattazione riguardante tutti gli altri parametri ambientali si rimanda al cap. 7.3.1.2.

Tutti i dati inseriti all'interno del Configuration File sono riepilogati in Tabella 7.6.

Strato	Spessore [m]	Conducibilità termica [W/m*K]	Resistenza termica [m ² *K/W]	Riferimento normativo
R _{se}			0,04	UNI 6946
Substrato SEIC	0.1		0.34	UNI 10351
Elemento di drenaggio, accumulo e aerazione <i>MediTherm MT 25.</i>	0,025	0,026	0,96	UNI 10351
Soletta tegolo in c.a.	0.10	1.91	0.05	UNI 10351
R _{si}			0.1	UNI 6946
			R _{tot} = 1.494	
			U = 1/R _{tot} = 0.669 W/m ² *K	

Tabella 7.5: calcolo della trasmittanza del pacchetto tetto corrispondente al GR.

Configuration File

Start Simulation at Day (DD.MM.YYYY):	= 19.07.2014
Start Simulation at Time (HH:MM:SS):	= 00:20:00
Total Simulation Time in Hours:	= 18.00
Save Model State each ? min	= 60

Wind Speed in 10 m ab. Ground [m/s]	= 0.32
Wind Direction (0:N..90:E..180:S..270:W..)	=237
Roughness Length z_0 at Reference Point	= 0.1
Initial Temperature Atmosphere [K]	= 306
Specific Humidity in 2500 m [g Water/kg air]	= 5
Relative Humidity in 2m [%]	= 75.8
[SOILDATA]	
Initial Temperature Upper Layer (0-20 cm) [K]	= 305
Initial Temperature Middle Layer (20-50 cm) [K]	= 305
Initial Temperature Deep Layer (below 50 cm)[K]	= 305
Relative Humidity Upper Layer (0-20 cm)	= 33.1
Relative Humidity Middle Layer (20-50 cm)	= 43.1
Relative Humidity Deep Layer (below 50 cm)	= 43.1
[BUILDING]	
Inside Temperature [K]	= 295
Heat Transmission Walls [W/m ² K]	= 3.5
Heat Transmission Roofs [W/m ² K]	= 0.67
Albedo Walls	= 0.5
Albedo Roofs	= 0.2

Tabella 7.6: valori inseriti all'interno del Configuration File relativo allo scenario "tutti tetti verdi a Sedum" in data 19/07/14. In grassetto sono evidenziati i valori modificati rispetto allo scenario 1.

7.4.2.3 I risultati

In Figura 7.25 si riportano le termografie orarie effettuate a 1.35 m dal suolo.

Nelle prime sei ore, ancora una volta, le temperature potenziali appaiono poco variabili. Alle 07:20 si verificano i primi cambiamenti veramente percepibili e le temperature continuano ad aumentare fino a raggiungere i valori massimi in corrispondenza delle 14:20. Alle 18:20 le temperature sono ancora alte, ma sono diminuite di circa 5°C rispetto le ore centrali. L'evoluzione della temperatura potenziale nell'arco della giornata, quindi, appare del tutto simile a quella del primo scenario, da cui si differenzia soltanto per i range sfiorati.

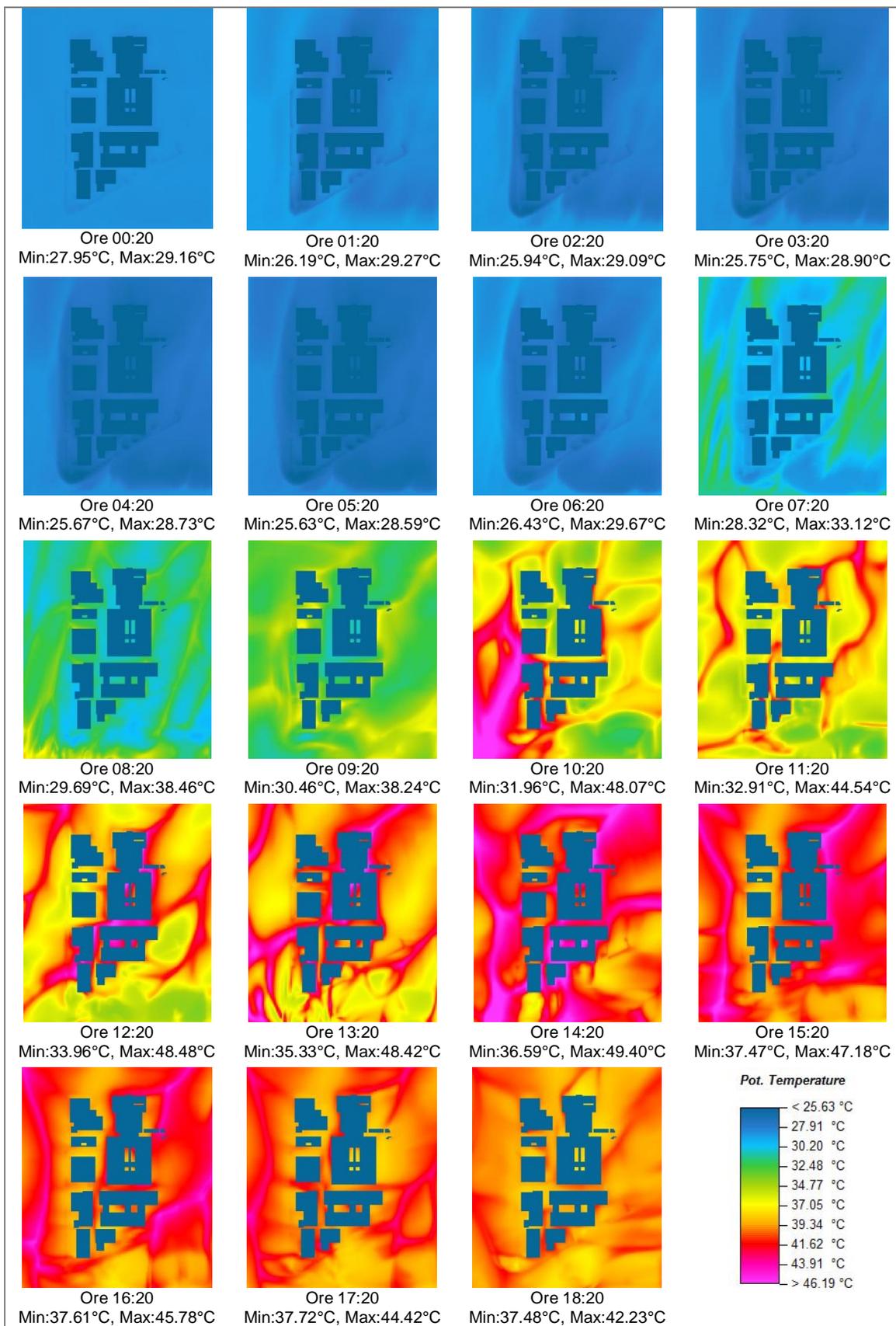
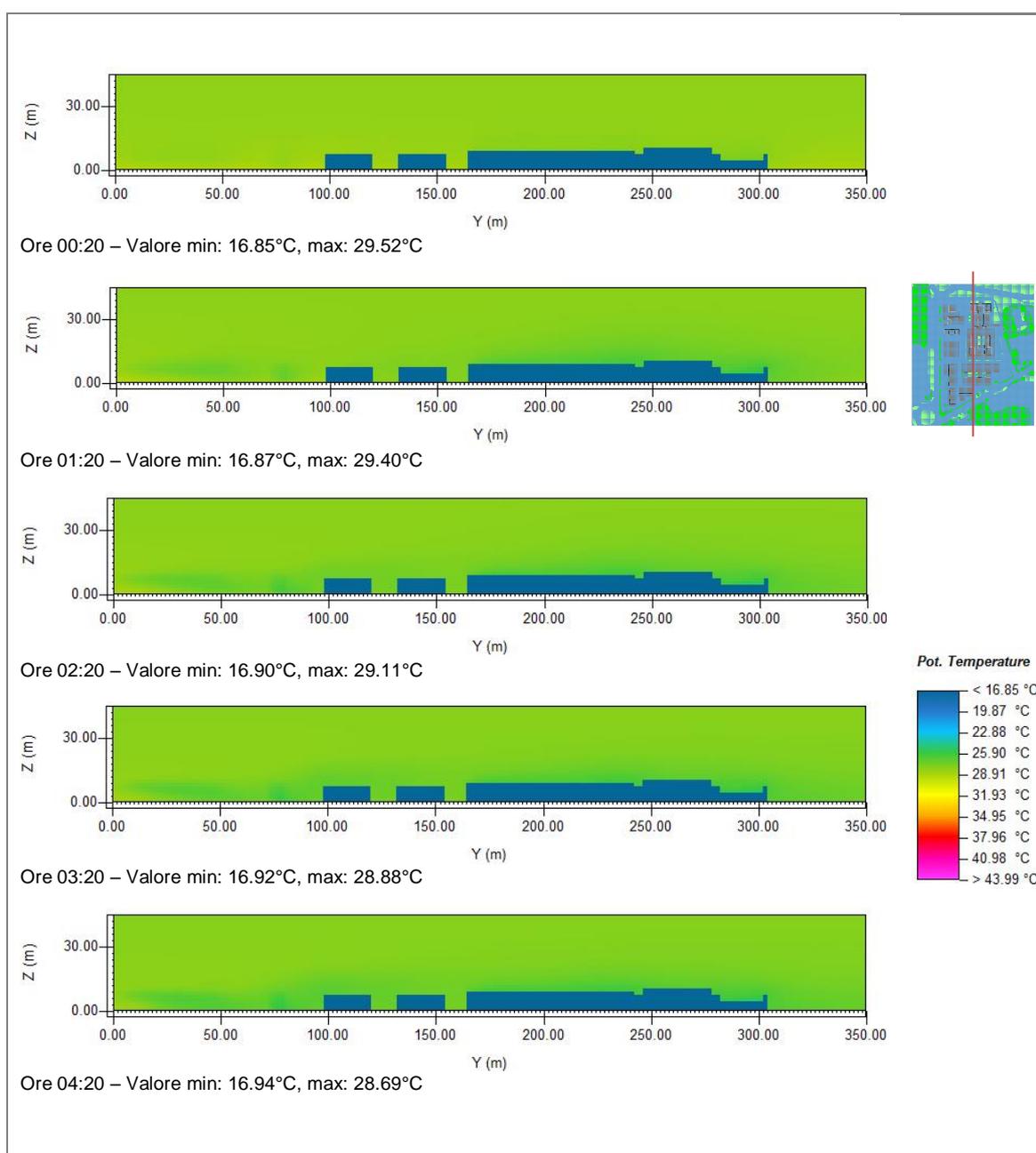
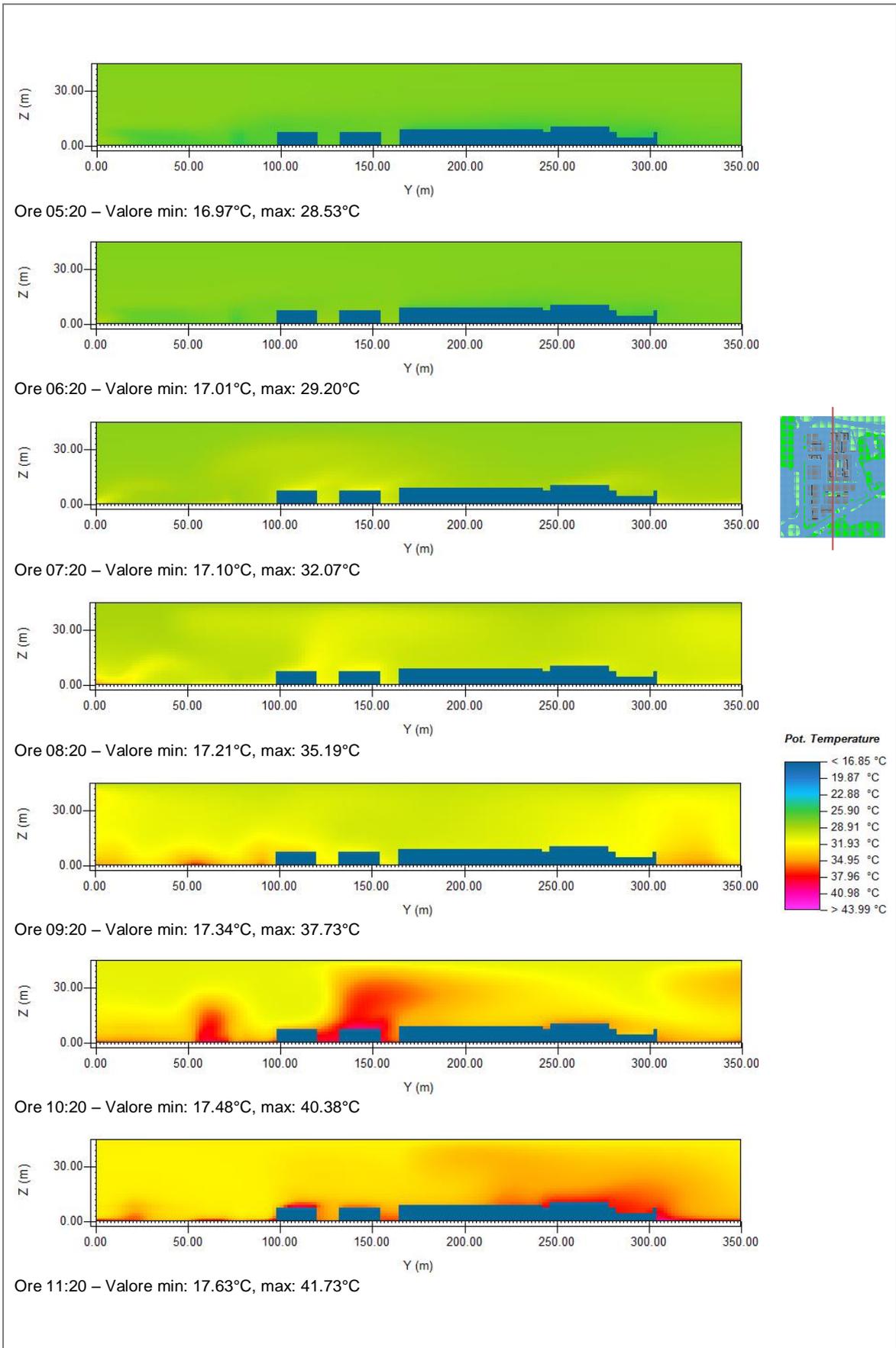


Figura 7.25: rappresentazione oraria della temperatura potenziale relativa alla quota di 1.35 m dal suolo per lo scenario 'tutti tetti verdi a Sedum' il 19/07/14. Si presti attenzione alla legenda, i cui valori differiscono da quelli di Figura 7.17.

Per valutare l'effetto isola di calore ci si avvale delle sezioni effettuate in corrispondenza di $X = 160$ m rappresentate in Figura 7.26.

Dalle immagini si evince come durante la notte, in corrispondenza delle coperture, si presentino temperature più fresche a causa del rilascio di umidità da parte della vegetazione. Si ricorda che l'isola di calore atmosferica è un fenomeno prevalentemente notturno. Alle prime ore del giorno tale effetto scompare lasciando spazio a temperature più alte, ma comunque inferiori rispetto a quelle dello scenario attuale. Le zone più calde si rivelano essere quelle centrali del lotto e la loro diffusione in altezza si estende fino a più di 30 m dal suolo.





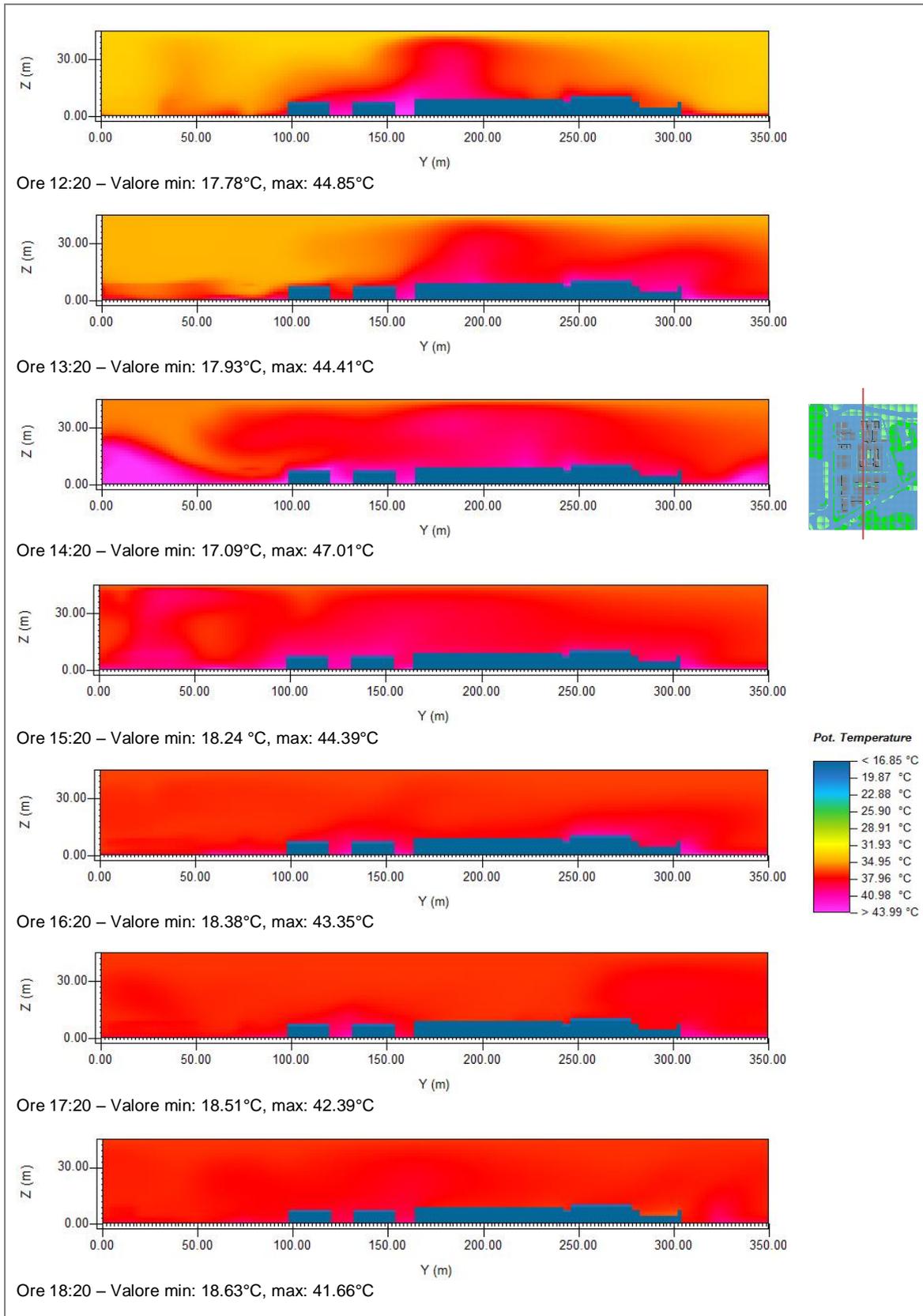


Figura 7.26: rappresentazione oraria della temperatura potenziale relativa alla sezione effettuata in corrispondenza di X (m) = 160 per lo scenario 'tutti tetti verdi a Sedum'.

7.4.3 Scenario 3: tetti verdi autoctoni in data 19/07/14

7.4.3.1 L'Area Input File

Per creare l'Area Input File relativo al terzo scenario è stato sufficiente disporre su tutte le coperture la tipologia di vegetazione definita in precedenza all'interno del file PLANT.DAT corrispondente al Native. Tra le tre altezze di substrato presenti sulla copertura del LAGIRN si è scelto di rappresentare quella intermedia, pari cioè a 10 cm. In questo modo il file .ai apparirà come da Figura 7.27.

7.4.3.2 Il Configuration File

Trattandosi sempre del medesimo pacchetto fornito dalla Harpo, anche per questo scenario è stato utilizzato il Configuration File con le modifiche apportate in Tabella 7.6. Le simulazioni saranno comunque differenziate l'una dall'altra grazie alla vegetazione disposta in copertura, le cui caratteristiche sono elencate in Tabella 7.2.

7.4.3.3 I risultati

In Figura 7.28 si riportano le termografie orarie effettuate a 1.35 m dal suolo.

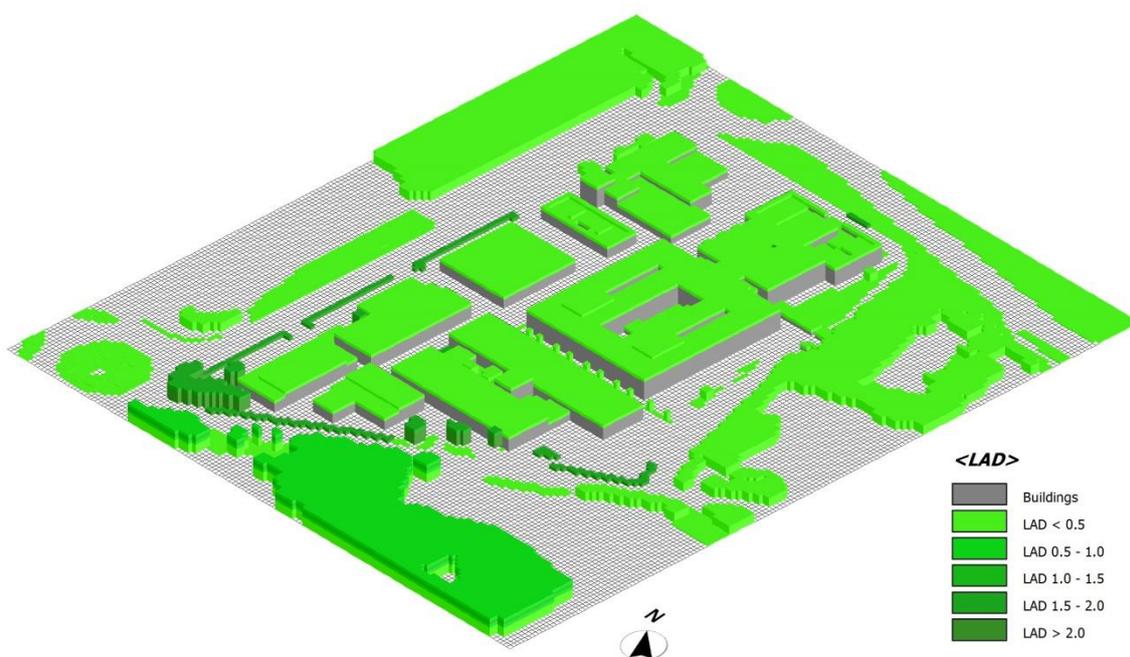


Figura 7.27: visualizzazione tridimensionale dell'Area Input File effettuata tramite Leonardo 2014 relativa allo scenario 3.

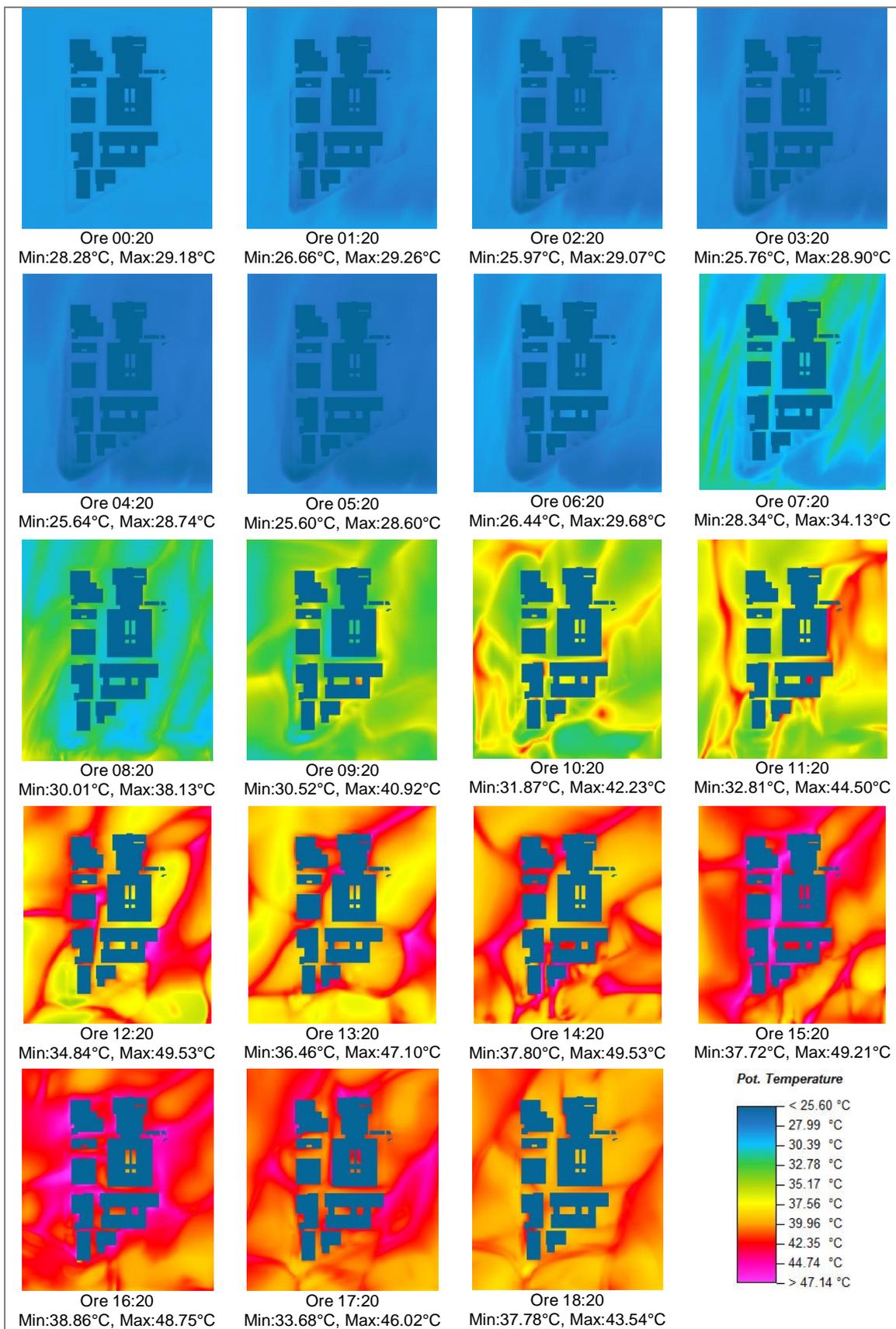
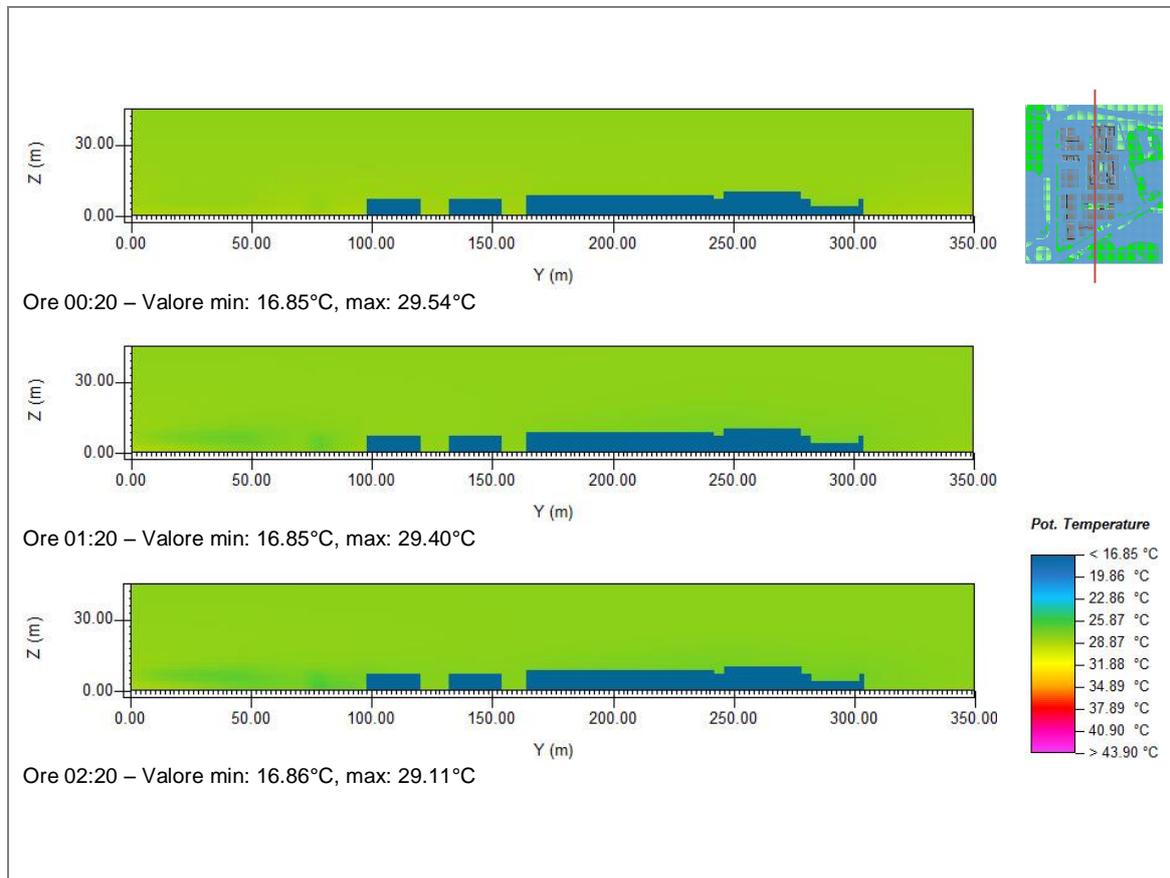


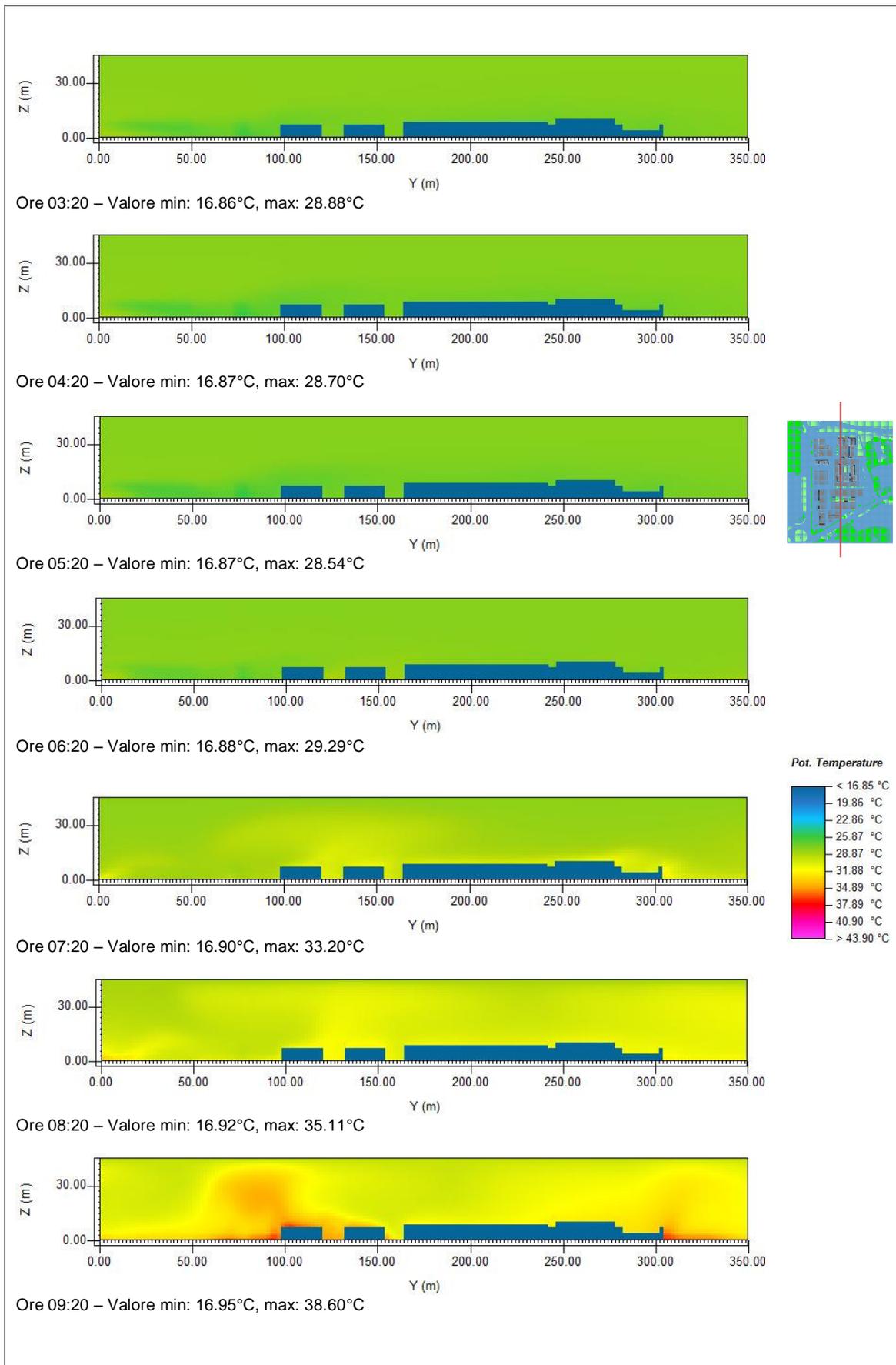
Figura 7.28: rappresentazione oraria della temperatura potenziale relativa alla quota di 1.35 m dal suolo per lo scenario 'tutti tetti verdi autoctoni'. Si presti attenzione alla legenda, i cui valori differiscono da quelli di Figura 7.17 e 7.23.

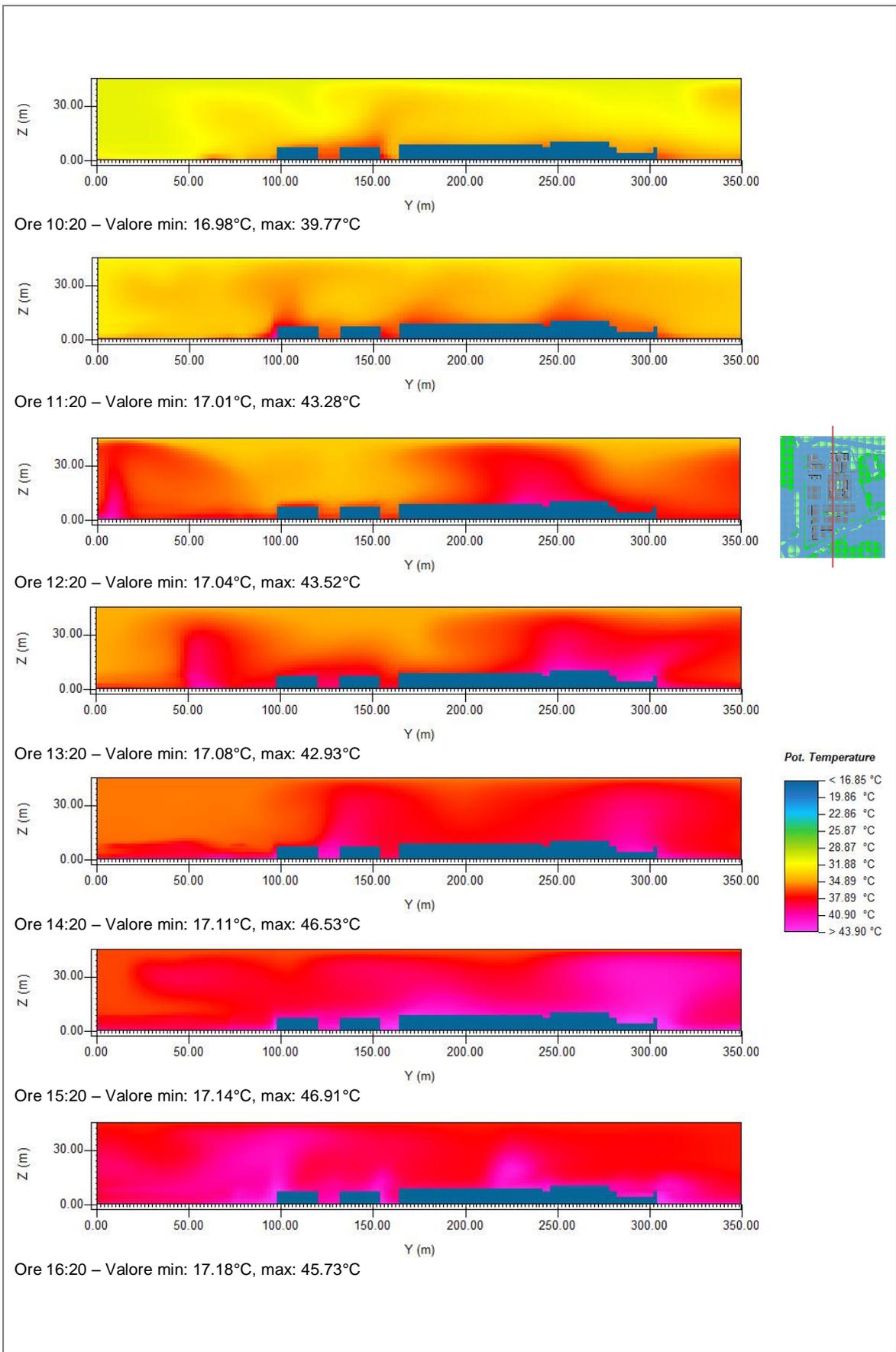
Nelle prime sei ore, per la terza volta, le temperature potenziali appaiono poco variabili. Alle 07:20 si verificano i primi cambiamenti veramente percepibili e le temperature continuano ad aumentare fino a raggiungere i valori massimi in corrispondenza delle 14:20. Alle 18:20 le temperature sono ancora alte, ma sono diminuite di circa 6°C rispetto le ore centrali. L'evoluzione della temperatura potenziale nell'arco della giornata, quindi, appare del tutto simile a quella degli altri due scenari, da cui si differenzia per i range raggiunti.

Per valutare l'effetto isola di calore ci si avvale delle sezioni effettuate in corrispondenza di X = 160 m rappresentate in Figura 7.29.

Dalle immagini si evince come durante la notte, in corrispondenza delle coperture, si presentino temperature più fresche a causa del rilascio di umidità da parte della vegetazione. Si ricorda che l'isola di calore atmosferica è un fenomeno prevalentemente notturno. Alle prime ore del giorno tale effetto scompare lasciando spazio a temperature più alte, ma comunque inferiori rispetto a quelle dello scenario attuale. Le zone più calde si rivelano essere quelle centrali del lotto e la loro diffusione in altezza si estende fino a più di 30 m dal suolo.







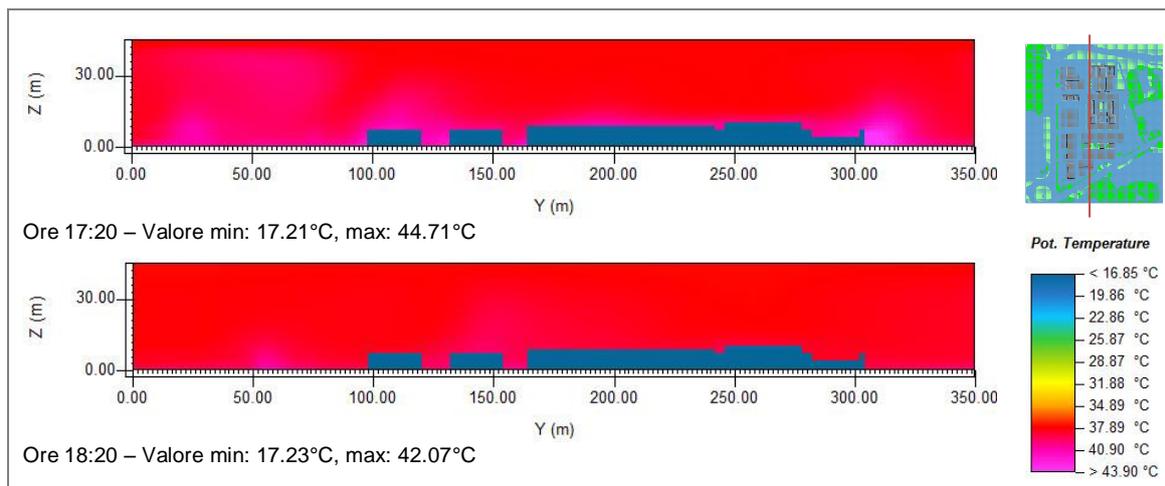


Figura 7.29: rappresentazione oraria della temperatura potenziale relativa alla sezione effettuata in corrispondenza di X (m) = 160 per lo scenario 'tutti tetti verdi autoctoni'.

7.4.4 Confronti tra scenari in data 19/07/14

Come anticipato all'interno del cap. 7.2.4, Leonardo 2014 è in grado di eseguire confronti tra scenari differenti, sia al variare dell'ora all'interno della stessa simulazione che per ambientazioni diverse già dalla nascita.

Si procede quindi ad eseguire dei raffronti tra i tre scenari modellati per la data estiva. Si è scelto di utilizzare come termine di paragone le configurazioni ipotetiche, pertanto valori positivi di gradiente termico implicano che la configurazione concernente lo stato di fatto è più calda di quella supposta.

7.4.4.1 Confronto tra scenario 1 e 2

In primo luogo è stato effettuato un confronto orario a livello planimetrico e nello specifico facendo riferimento alla quota proposta per l'analisi dei singoli scenari, ovvero 1.35 m dal suolo (Figura 7.30).

Durante le prime sei ore simulate le differenze riscontrate nelle temperature potenziali dei due scenari è minima (da -0.31 a 1.72°C). Lo stato attuale si rivela essere poco più fresco rispetto a quello modellato nelle zone più periferiche del lotto (in media di 0.10°C) e soprattutto là dove il vento è libero di soffiare senza incontrare ostacoli. Si dimostra essere invece mediamente più caldo di 1.4°C a ridosso degli edifici.

Dalle 07:20 in poi le differenze sono più accentuate. Le zone dove sono più percepibili sono quelle frutto della scia calda emanata dagli edifici.

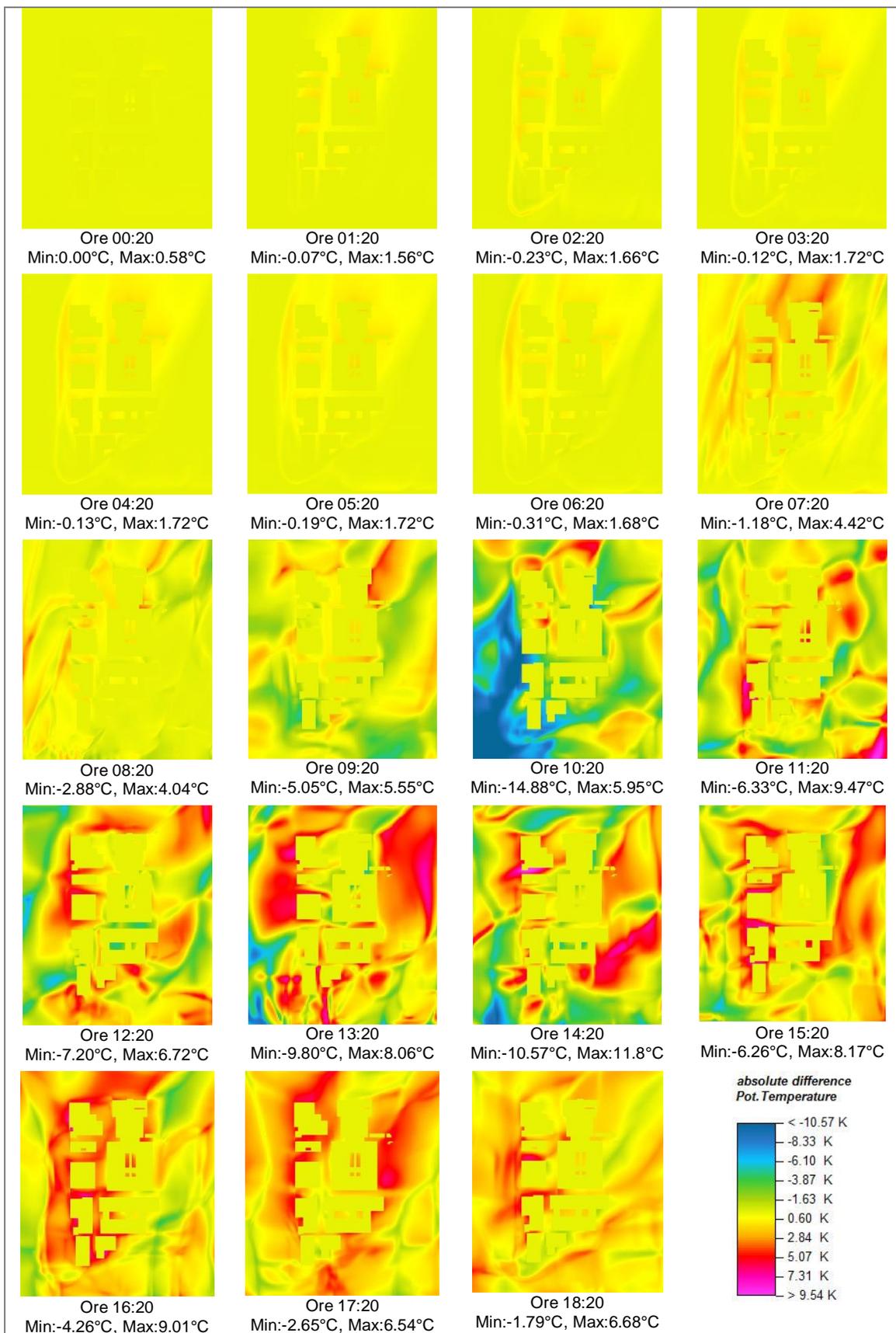


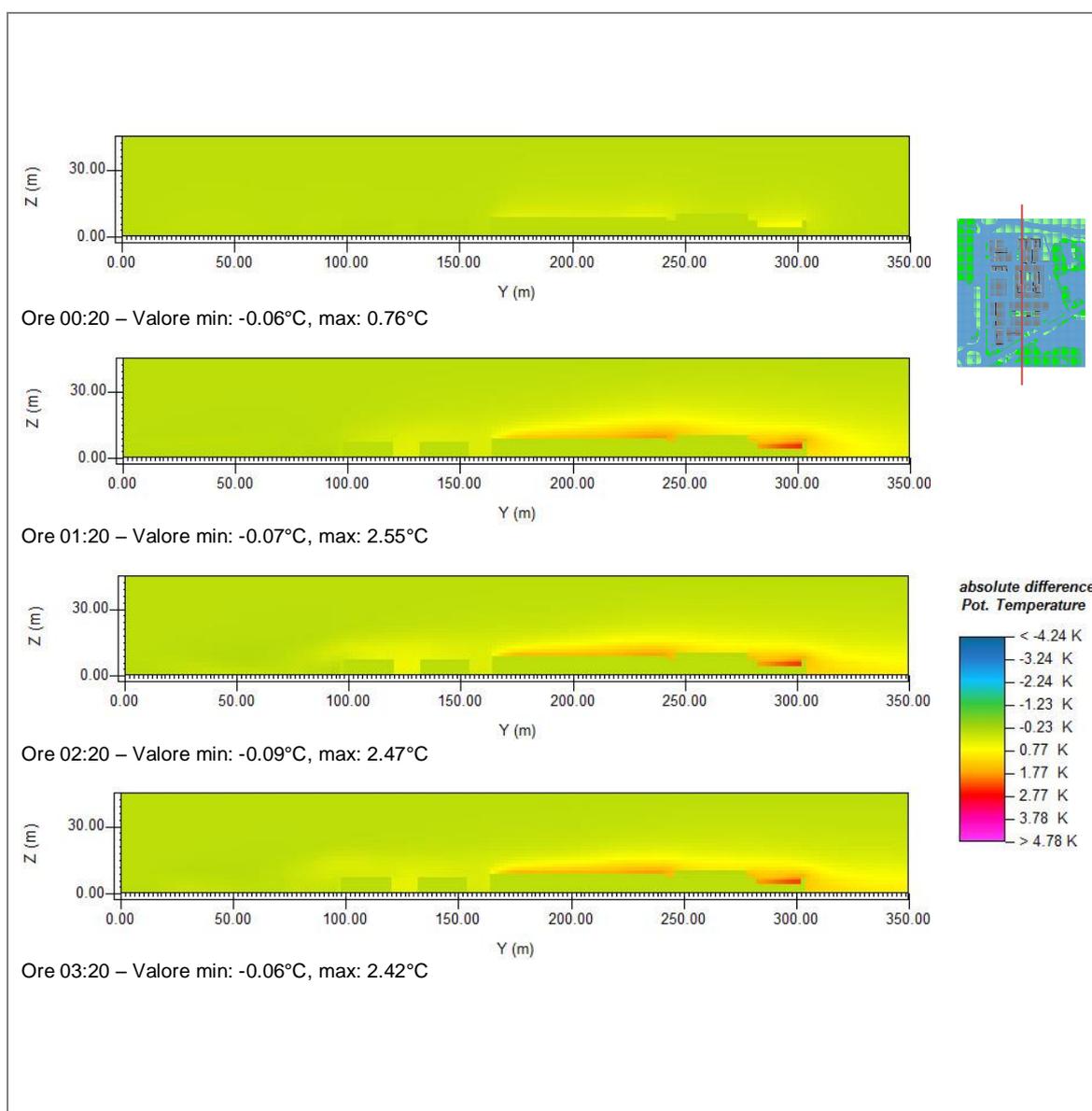
Figura 7.30: rappresentazione planimetrica oraria della differenza di temperatura potenziale tra il primo ed il secondo scenario relativa alla quota di 1.35 m dal suolo

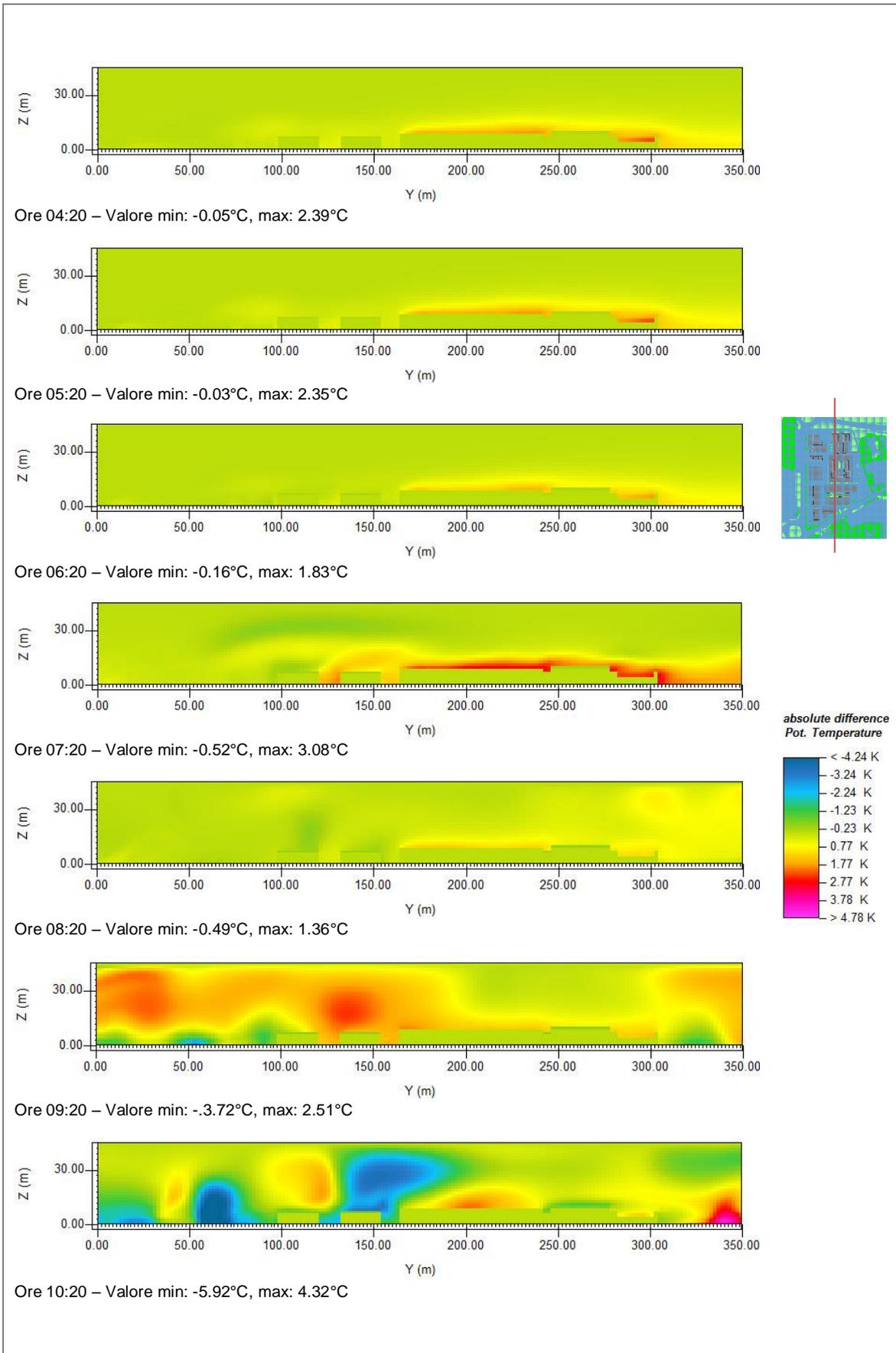
L'effetto benefico dei tetti verdi è evidente soprattutto nelle ore centrali (dalle 13:20 alle 16:20) per cui si ottiene un raffrescamento massimo medio di ben 9.25°C.

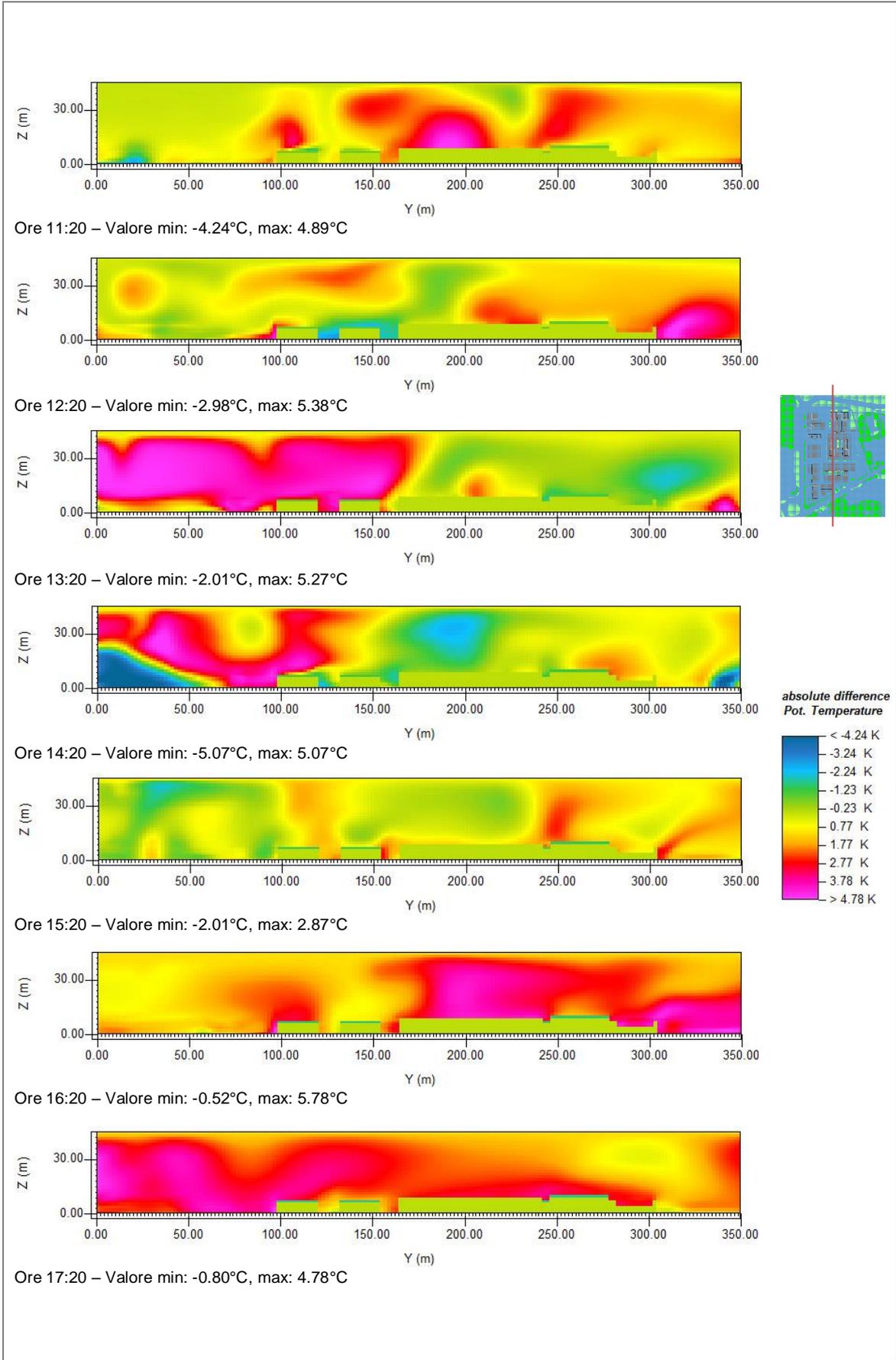
Per valutare i benefici nella lotta al fenomeno isola di calore ci si avvale dei confronti tra le sezioni effettuate in corrispondenza di $X = 160$ m rappresentate in Figura 7.31.

Già nelle prime ore del giorno si nota l'influenza della copertura verde sull'area dell'edificio principale e di quello dei dipartimenti. Infatti dalle 00:20 alle 07:20 è presente un alone giallo-rosso in questa zona che mette in luce la differenza tra i due scenari: lo stato attuale genera una temperatura potenziale superiore di circa 2°C.

Il massimo beneficio da parte delle coperture a Sedum si evidenzia per le 16:20 per cui la differenza massima tra i due scenari raggiunge i 5.78°C.







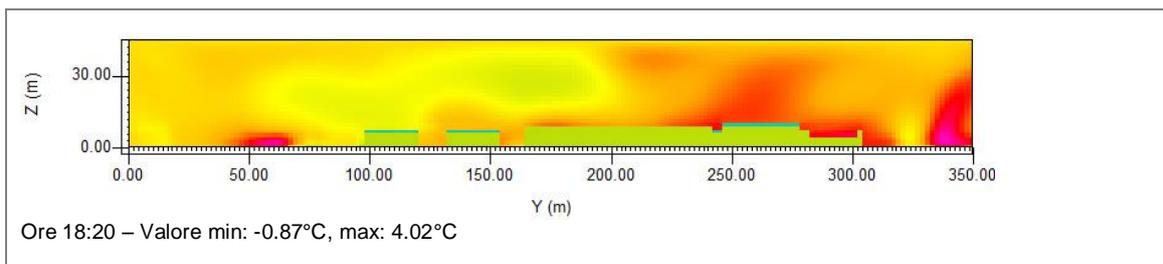


Figura 7.31: rappresentazione oraria della differenza di temperatura potenziale tra il primo ed il secondo scenario relativa alla sezione per $X (m) = 160$. Valori positivi indicano che lo scenario 1 è più caldo rispetto al numero 2.

7.4.4.2 Confronto tra scenario 1 e 3

Come per il caso precedente, in primo luogo è stato effettuato un confronto orario a livello planimetrico (Figura 7.32).

Durante le prime sei ore i range di variabilità delle differenze nelle temperature potenziali dei due scenari sono minimi (da -0.52 a 0.61°C) e meno ampi rispetto al confronto tra lo stato attuale e quello con tutte le coperture a Sedum per cui si registravano valori tra -0.31 e 1.72°C . In media la differenze orarie in questo periodo non sono nemmeno percepibili, poiché si tratta di centesimi di grado.

Se dalle 7:20 alle 9:20 a livello pedonale risulta più fresco il primo scenario, la presenza della copertura autoctona inizia a diventare tangibile dalle 10:20 in poi. L'effetto benefico dei tetti verdi è evidente soprattutto nelle ore centrali (dalle 13:20 alle 15:20) per cui si ottiene un raffrescamento massimo medio di 8.23°C .

Per valutare i benefici nei confronti dell'isola di calore ci si avvale ancora una volta delle comparazioni tra sezioni in corrispondenza di $X = 160$ m, rappresentate in Figura 7.33.

Anche in questo caso, già nelle prime ore del giorno si nota l'influenza della copertura verde sull'area dell'edificio principale e di quello dei dipartimenti. Infatti dalle 00:20 alle 08:20 è presente un alone giallo in questa zona che mette in luce la differenza tra i due scenari: lo stato attuale genera una temperatura potenziale superiore di circa 0.50°C .

I benefici derivanti dalla configurazione con coperture con tetti verdi autoctoni diventano più marcati dalle 11:20 in avanti. Il massimo raffrescamento si riscontra per le 12:20 per cui la differenza massima tra i due scenari raggiunge i 6.58°C .

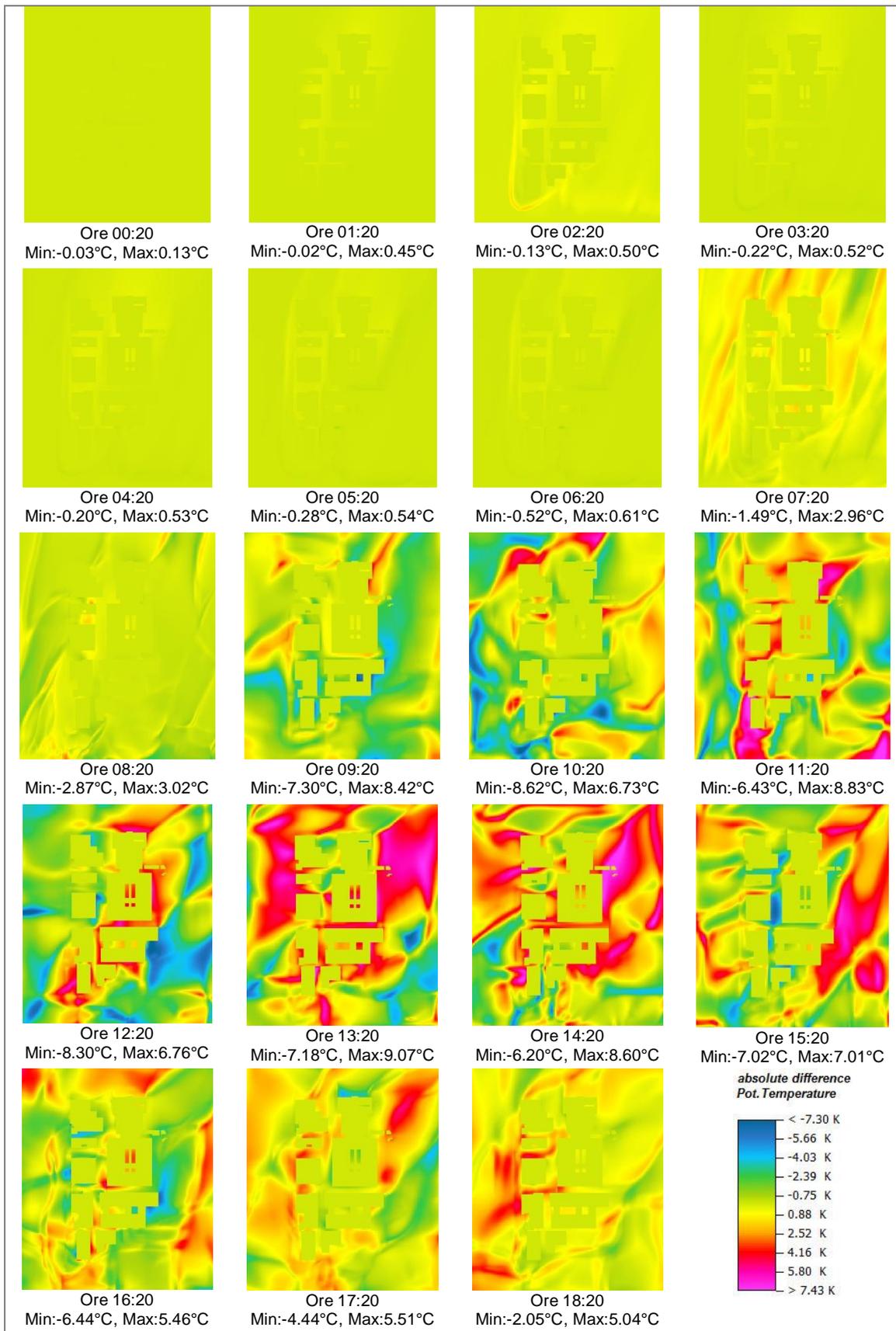
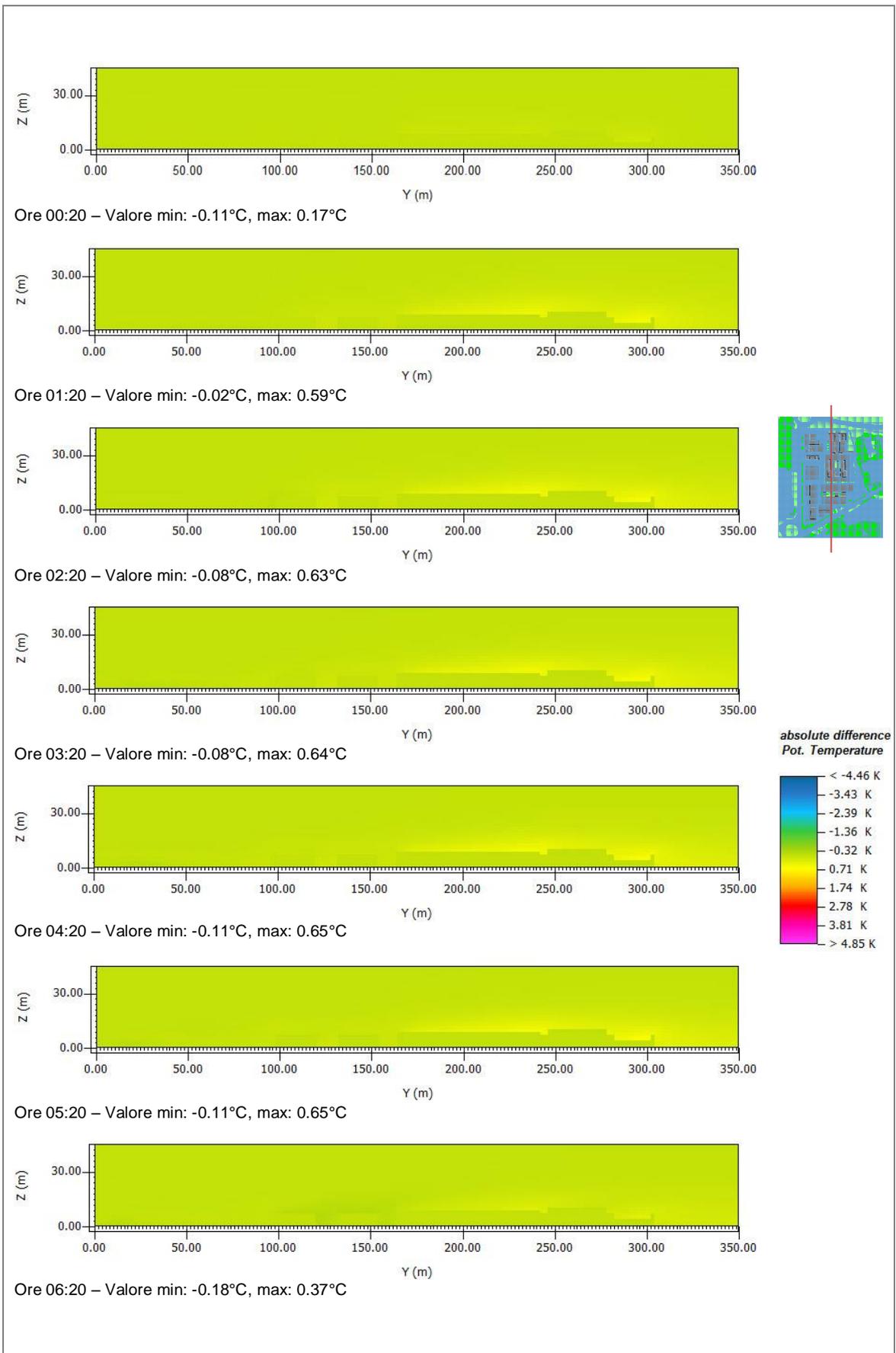
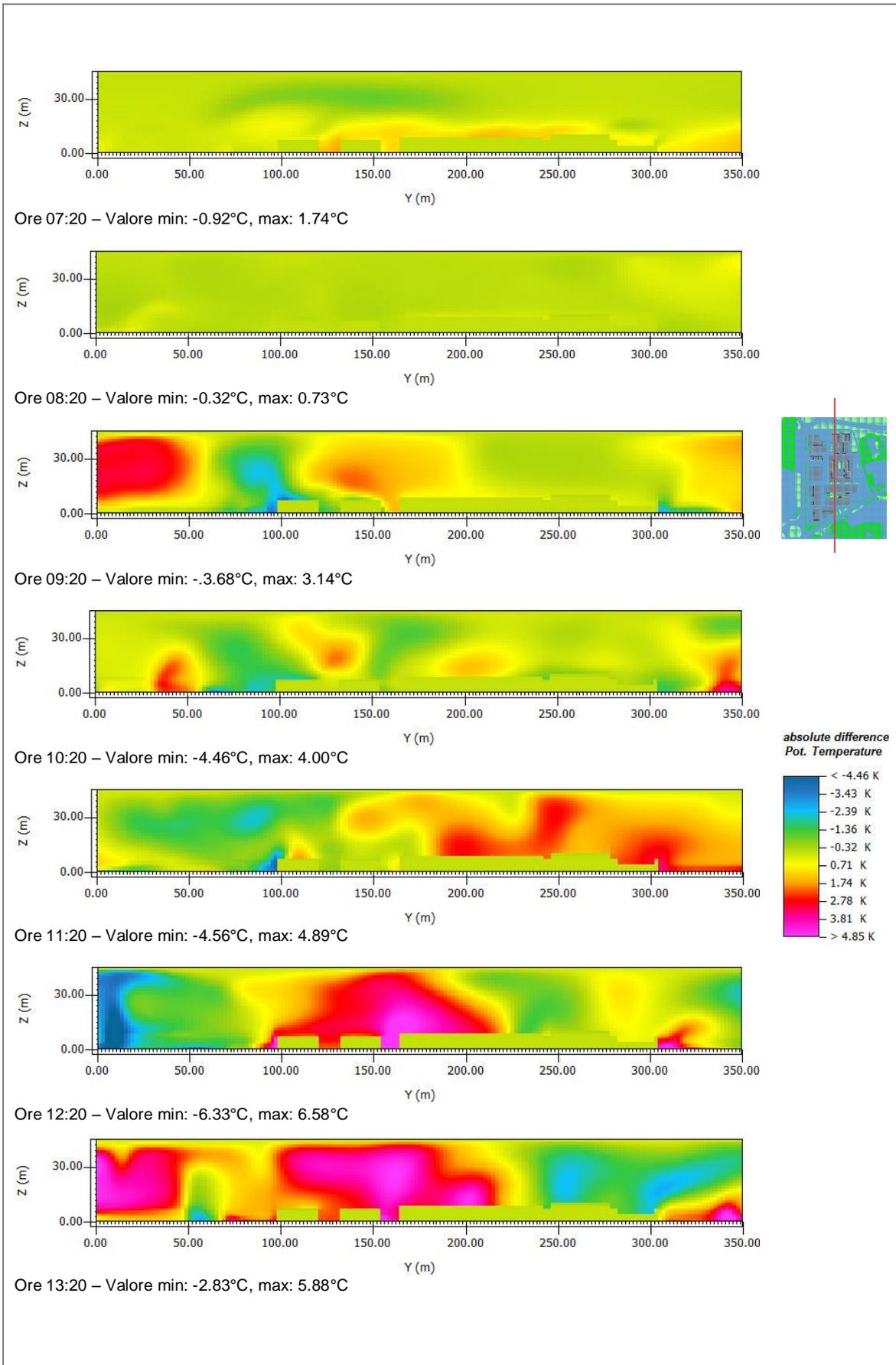


Figura 7.32: rappresentazione planimetrica oraria della differenza di temperatura potenziale tra il primo ed il secondo scenario relativa alla quota di 1.35 m dal suolo





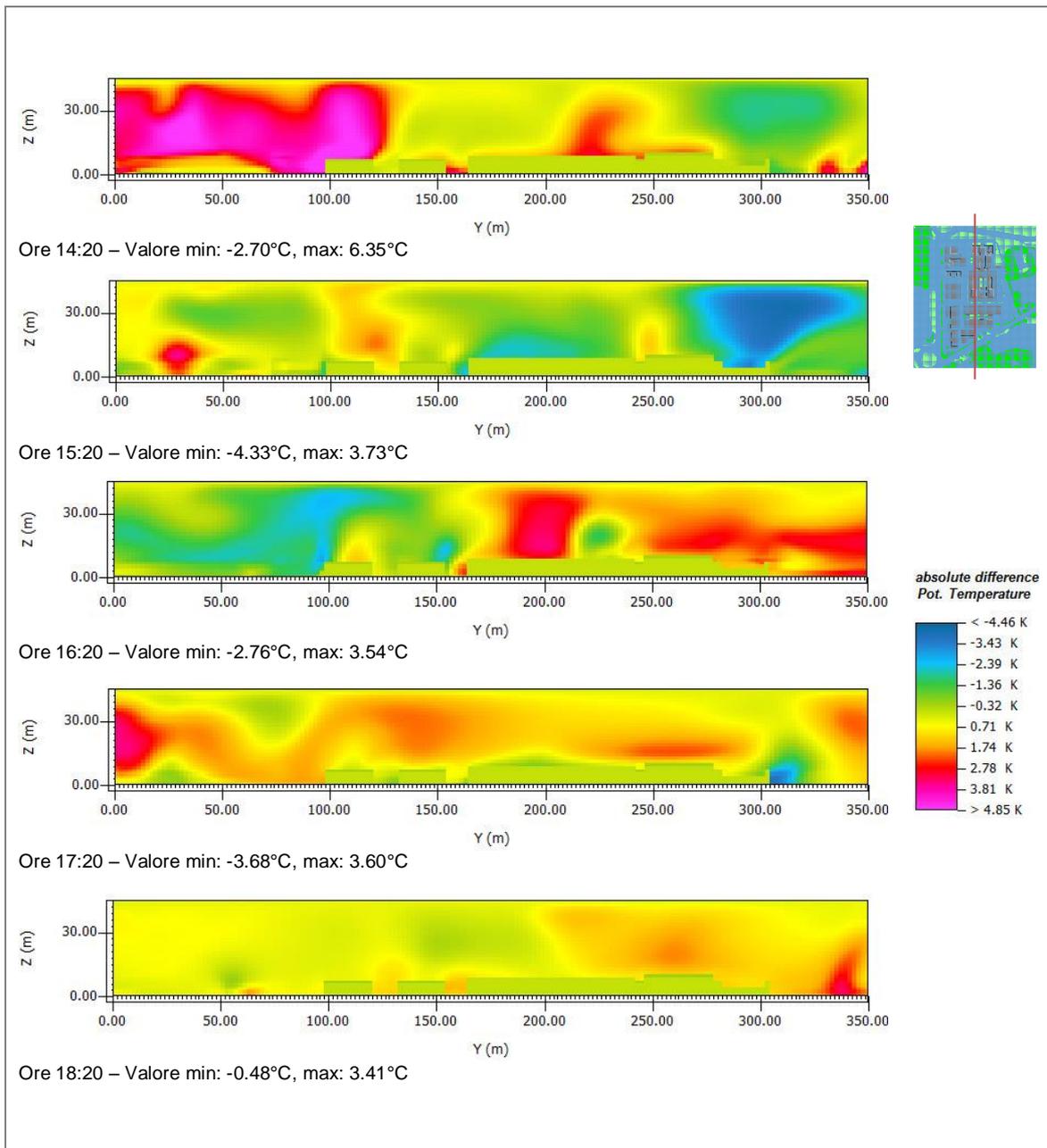


Figura 7.33: rappresentazione oraria della differenza di temperatura potenziale tra il primo ed il terzo scenario relativa alla sezione per $X(m) = 160$. Valori positivi indicano che lo scenario 1 è più caldo rispetto al numero 3.

7.4.5 Scenario 4: lo stato attuale in data 24/10/14

7.4.5.1 L'Area Input File

Per l'Area Input File corrispondente a questo scenario è stato utilizzato nuovamente il file relativo alla configurazione numero uno, in quanto rappresentativo dello stato di fatto.

7.4.5.2 Il Configuration File

Le ultime tre simulazioni sono state condotte durante una tipica giornata del mese di Ottobre. Tramite i dati storici di temperatura relativi dell'ultimo decennio (2004 – 2013) è stato possibile scegliere una giornata che rispecchiasse gli andamenti termici medi mensili (Figura 7.34). In più si è cercato di optare per un giorno di cui si disponesse anche dei dati delle termocoppie per poter effettuare eventuali confronti al termine della simulazione. Pertanto è stata scelta la giornata del 24 Ottobre.

Si è scelto di far partire la simulazione proprio in corrispondenza della mezzanotte in quanto per tale orario si registrava il primo vento della giornata ed il programma non ammette come condizione iniziale quella di vento assente.

Si è optato inoltre per farla durare 24 ore nonostante i lunghi tempi computazionali. Si precisa infatti che per completare la simulazione sono stati necessari cinque giorni di calcolo, vista la complessità e l'estensione dell'area analizzata.

Per tutti i dati ambientali si è fatto riferimento alla strumentazione allocata sul tetto descritta nel capitolo 6.2.

Nota la velocità del vento ad 8.18 m dal suolo, ovvero nel punto in cui è innestato l'anemometro, la si è convertita nella velocità richiesta come input dal programma

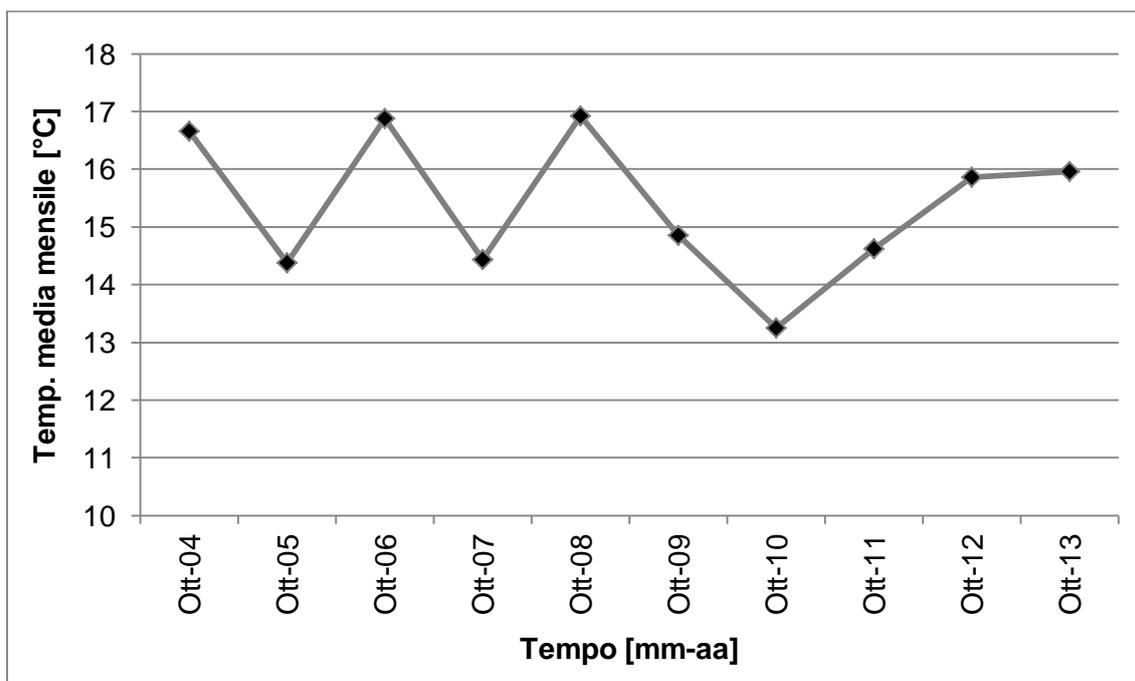


Figura 7.34: andamento delle temperature medie storiche per il mese di Ottobre

tramite il Wind Profile Calculator (61).

Per quanto riguarda la direzione di provenienza dello stesso, si ricorda che la mappa è stata ruotata di 37° in senso antiorario. Di conseguenza nonostante la stazione alle 00:00 registrasse del vento proveniente da 84°, in input andrà inserito un valore pari a $84^\circ - 37^\circ = 47^\circ$.

Siccome viene richiesto di inserire la scabrezza relativa a 10 m dal suolo, trattandosi di aria, tale valore sarà pari a 0.1.

All'ora d'inizio della simulazione il data logger segnava 13.40°C.

Dando per assodate le considerazioni effettuate all'interno del capitolo 7.4.1.2, si è assegnato alla temperatura potenziale TP(2500 m) un valore di 288.5 K.

Grazie al diagramma temperatura – umidità relativa si è dedotta l'umidità specifica a 2500 m in funzione della temperatura T(2500 m) (62).

Per quanto concerne l'umidità relativa a 2 m, invece, siccome la stazione Hobo è posta a circa la medesima distanza dal tetto verde, si suppone, come di consueto, che il valore registrato dalla sua sonda corrisponda ad un eventuale valore a livello del terreno.

Il Configuration File è stato poi arricchito con le sezioni [SOILDATA] e [BUILDING] per rendere ancora più verosimile la simulazione.

Per quanto riguarda la prima sezione, per la temperatura della prima fascia (0-20 cm) si è fatto riferimento ai dati scaricati dalla sonda FT-90 posta nel GR ad una profondità pari a 10 cm, che alle 00:00 del 24/10/14 indicava una temperatura di 14.7°C, pari a circa 288 K.

Per quanto concerne le due fasce più profonde, non disponendo di parametri per la loro determinazione, si è riproposto il valore precedente, così come veniva fatto nella sezione allo stato di default.

L'umidità relativa è invece stata determinata grazie al parametro *Soil Moisture* evidenziato dalla stazione Hobo. Esso indicava un valore pari al 47.8% a circa 5 cm di profondità ed è pertanto stato assegnato alla prima fascia. Per le altre due si è aggiunto il 10% di umidità, così come si presentava la sezione allo stato di default.

La seconda sezione, ovvero [BUILDING], è quella che differenzia sostanzialmente i tre scenari simulati. Infatti all'interno di essa vengono richiesti dei parametri, quali la trasmittanza e l'albedo, che variano sostanzialmente nei tre casi.

Per il calcolo della trasmittanza concernente la copertura e le pareti di questo scenario valgono le considerazioni descritte all'interno del capitolo 7.4.1.2, pertanto essa varrà $4.5 \text{ W/m}^2\text{K}$ nel primo caso e $3.5 \text{ W/m}^2\text{K}$ nel secondo.

Supponendo che tutte le coperture del Lazzaretto siano rivestite con guaina bituminosa, si assegna ad esse un valore di albedo pari a 0.1, mentre per le pareti, essendo per la maggior parte in colore chiaro, si attribuisce un valore pari a 0.5 (64).

Tutti i dati inseriti all'interno del Configuration File sono riassunti in Tabella 7.7.

7.4.5.3 I risultati

In Figura 7.35 si riportano le termografie orarie effettuate a 1.35 m dal suolo.

Dall'ora d'inizializzazione fino alle 08:00 le temperature potenziali appaiono in calo e pressoché stazionarie, mostrando variazioni massime orarie di circa un paio di gradi.

Dalle 09:00 avvengono i primi cambiamenti veramente percepibili: la temperatura dall'aria inizia ad alzarsi e continua ad aumentare fino a raggiungere i valori massimi (24.86°C) in corrispondenza delle 14:00. Alle 10:00 e alle 11:00 inoltre si riscontra un'intensificazione del vento proveniente dalla parte settentrionale dell'area. Dalle 17:00 in poi si nota come, invece, la temperatura diminuisca fino a raggiungere circa 16°C alla mezzanotte successiva.

Per valutare l'effetto isola di calore ci si avvale delle sezioni effettuate in corrispondenza di $X = 160 \text{ m}$ rappresentate in Figura 7.36.

Dalle immagini si evince, ancora una volta, come il calore emanato dalla pavimentazione e dalle coperture in guaina bituminosa si elevi superando anche i 30 m dal suolo, creando una vera e propria cappa di aria calda sul lotto.

Il vento risulta provenire per la maggior parte dei casi da nord (ovvero da destra verso sinistra per quanto concerne le sezioni). Pertanto è possibile notare come sottovento rispetto ai laboratori si crei un'area più fresca a cui contribuisce anche la presenza della vegetazione nella parte meridionale del plesso.

Così come accadeva per il primo scenario, anche in questo caso nelle ore centrali del giorno è percepibile l'effetto canyon. A tal proposito attira l'attenzione la zona relativa alla corte interna dell'edificio dedicato ai laboratori, che risulta sempre più calda

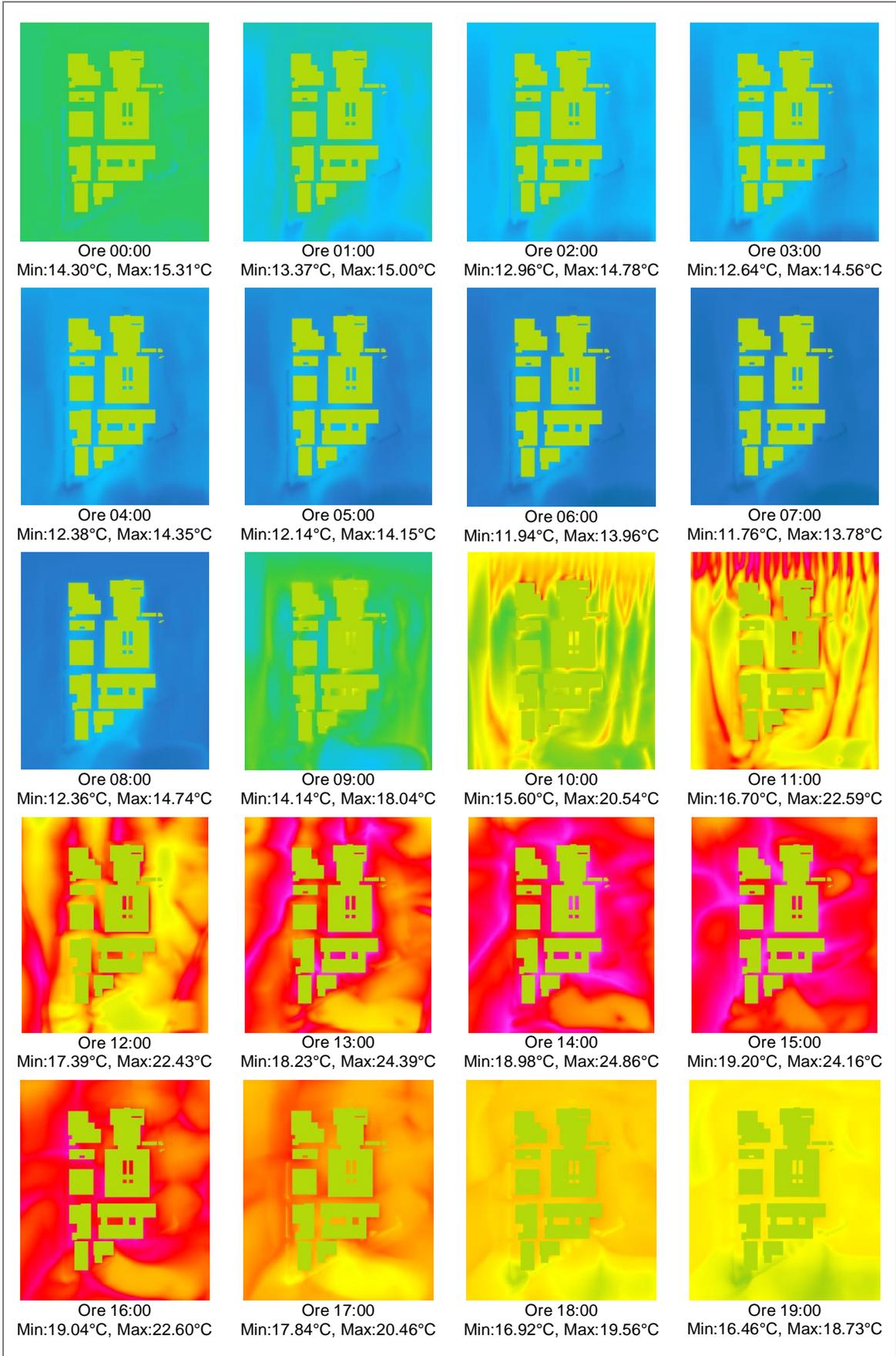
rispetto al canyon in corrispondenza di $Y = 160$ m, proprio a causa della sua conformazione chiusa.

Confrontando queste sezioni con quella effettuata in corrispondenza del tetto verde del LAGIRN (Figura 7.37), si nota come la sua presenza sia apprezzabile già nelle prime ore del giorno, durante le quali si mantiene più fresco di 1 grado rispetto al contesto alla medesima quota.

Se attorno alle sei del mattino si registrano i valori minimi di temperatura in modo omogeneo all'interno di tutta la sezione, la presenza del tetto verde torna a essere

Configuration File	
Start Simulation at Day (DD.MM.YYYY):	= 24.10.2014
Start Simulation at Time (HH:MM:SS):	= 00:00:00
Total Simulation Time in Hours:	= 24.00
Save Model State each ? min	= 60
Wind Speed in 10 m ab. Ground [m/s]	= 0.3
Wind Direction (0:N..90:E..180:S..270:W..)	=47
Roughness Length z_0 at Reference Point	= 0.1
Initial Temperature Atmosphere [K]	= 288.5
Specific Humidity in 2500 m [g Water/kg air]	= 3
Relative Humidity in 2m [%]	= 65.4
[SOILDATA]	
Initial Temperature Upper Layer (0-20 cm) [K]	= 288
Initial Temperature Middle Layer (20-50 cm) [K]	= 288
Initial Temperature Deep Layer (below 50 cm)[K]	= 288
Relative Humidity Upper Layer (0-20 cm)	= 47.8
Relative Humidity Middle Layer (20-50 cm)	= 57.8
Relative Humidity Deep Layer (below 50 cm)	= 57.8
[BUILDING]	
Inside Temperature [K]	= 295
Heat Transmission Walls [W/m ² K]	= 3.5
Heat Transmission Roofs [W/m ² K]	= 4.5
Albedo Walls	= 0.5
Albedo Roofs	= 0.1

Tabella 7.7: valori inseriti all'interno del Configuration File relativo allo scenario attuale in data 24 Ottobre 2014.



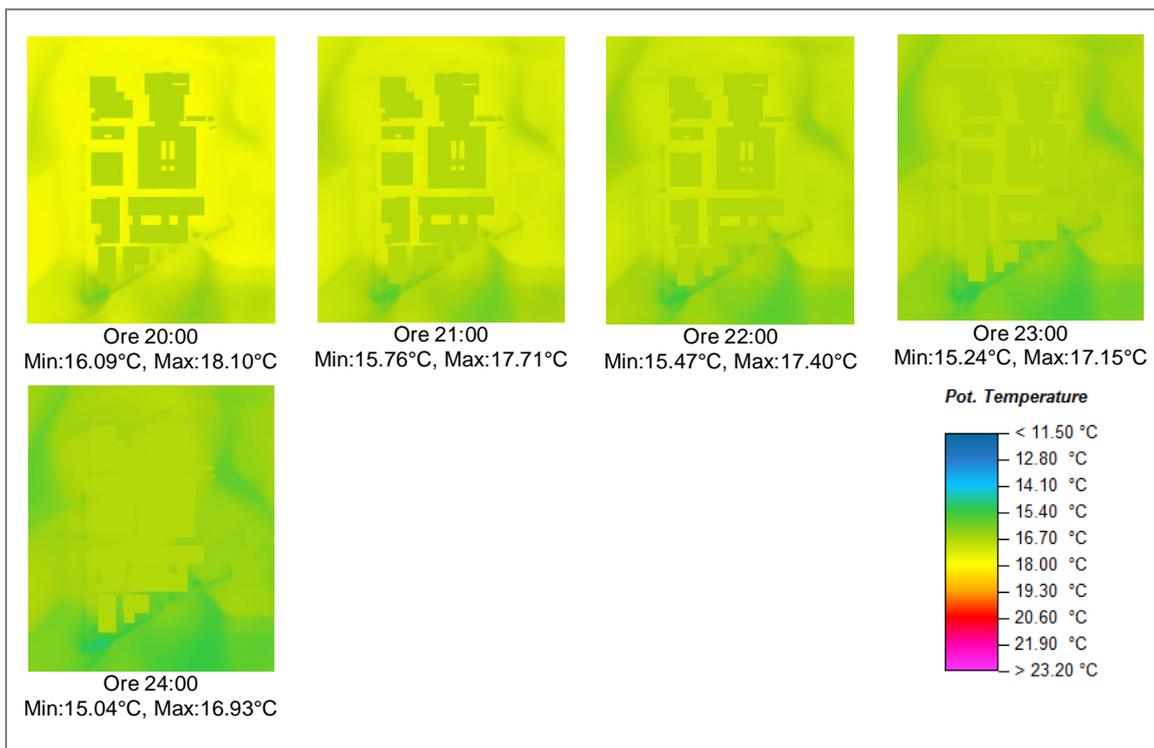
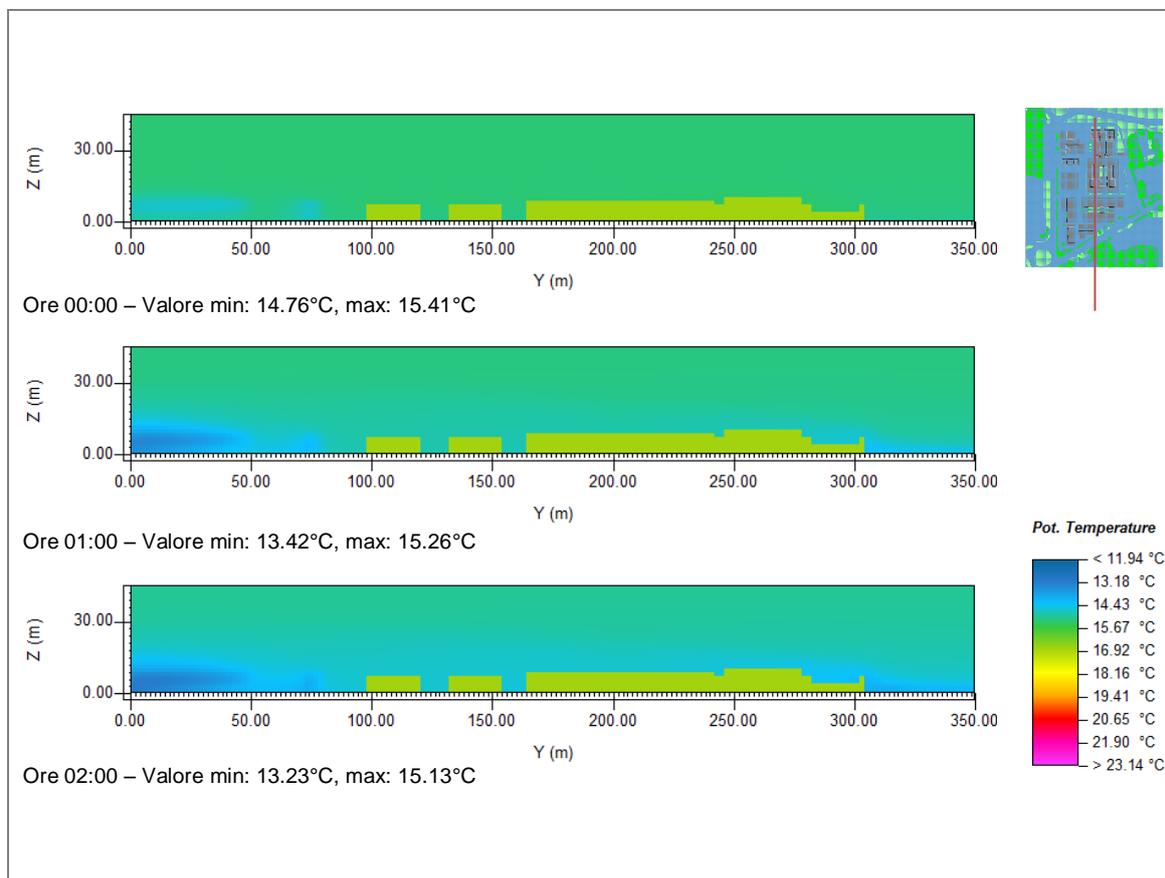
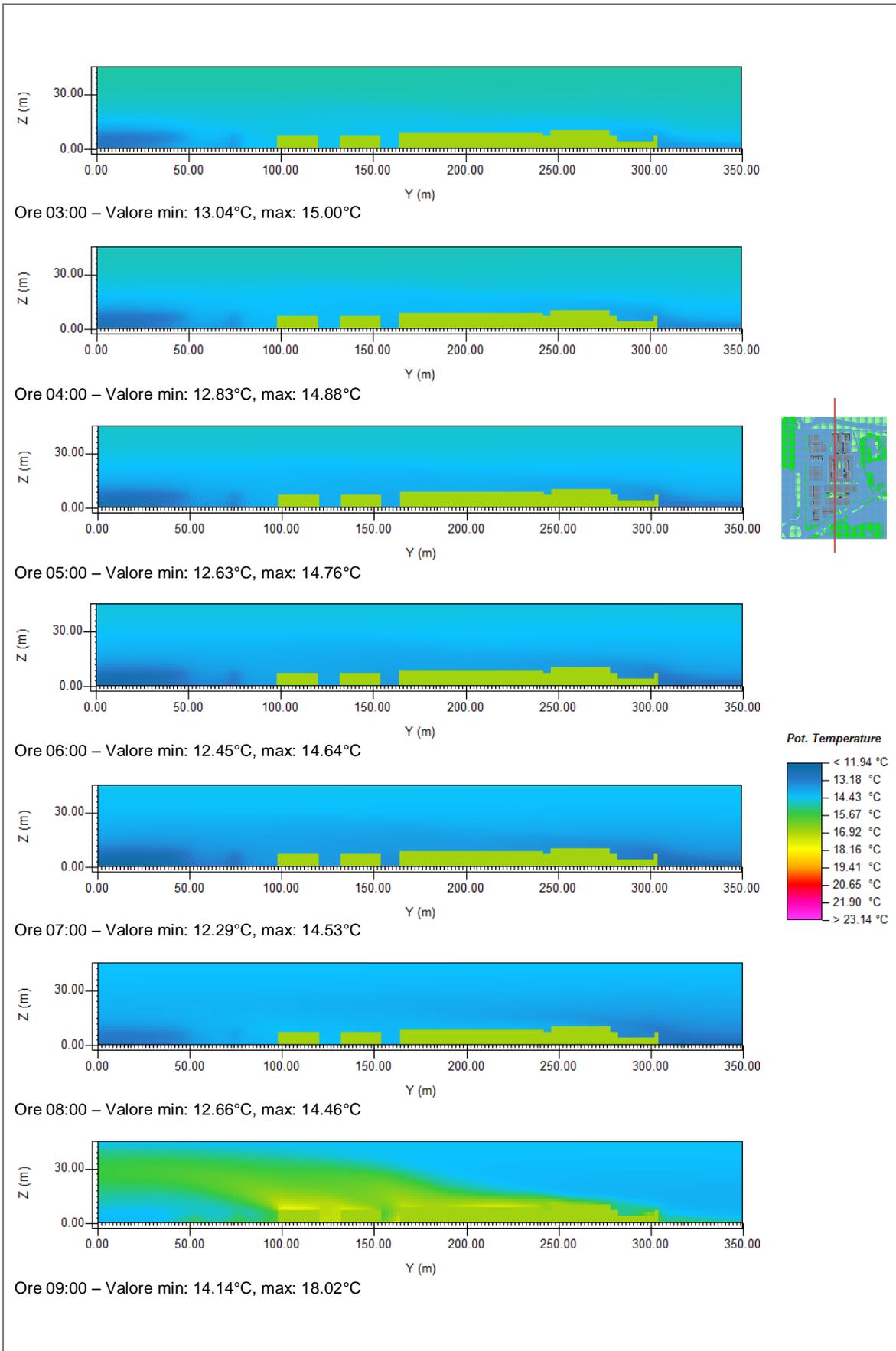
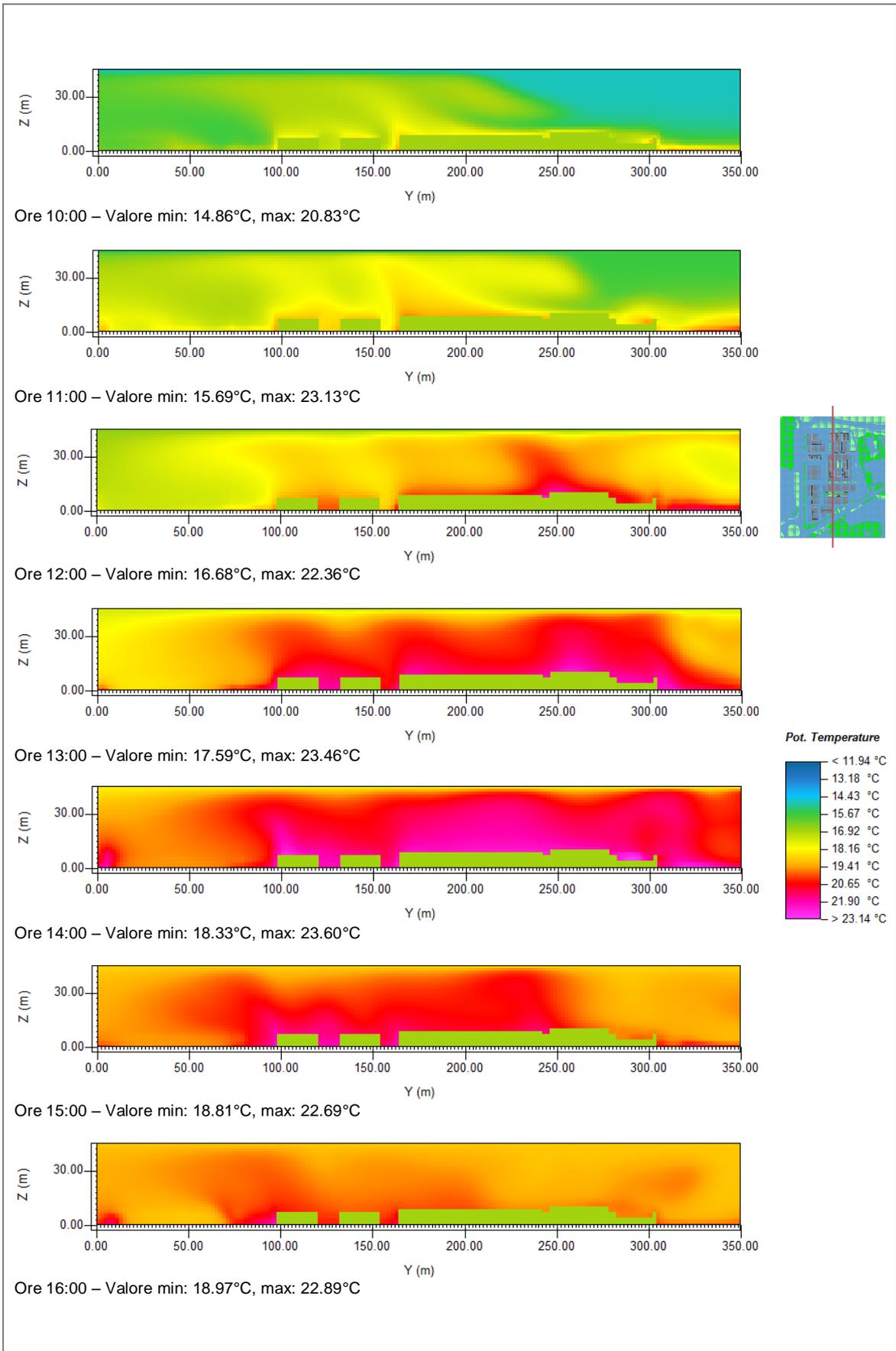
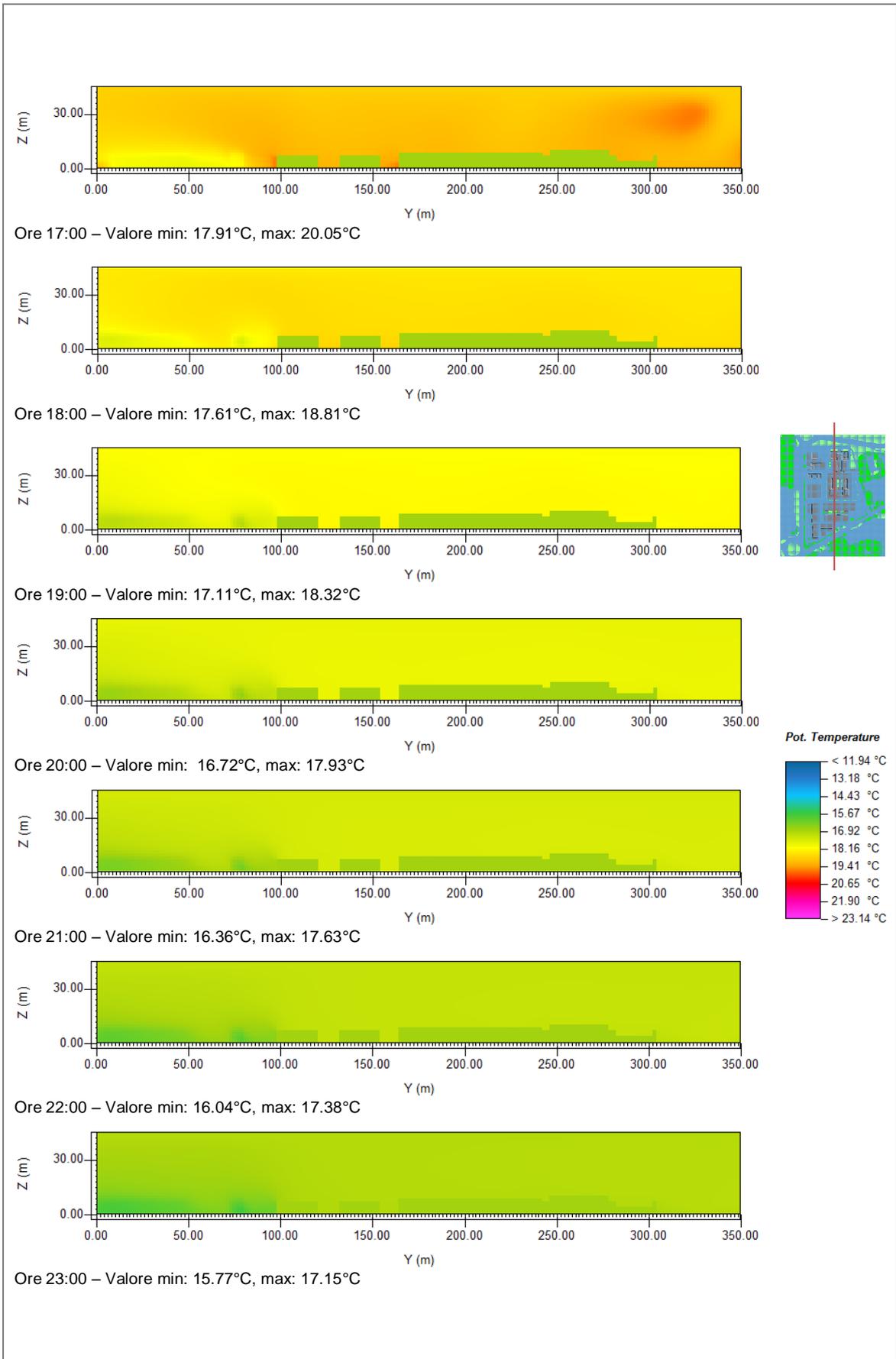


Figura 7.35: rappresentazione oraria della temperatura potenziale relativa alla quota di 1.35 m dal suolo per lo scenario 4 corrispondente allo stato di fatto in data 24/10/14.









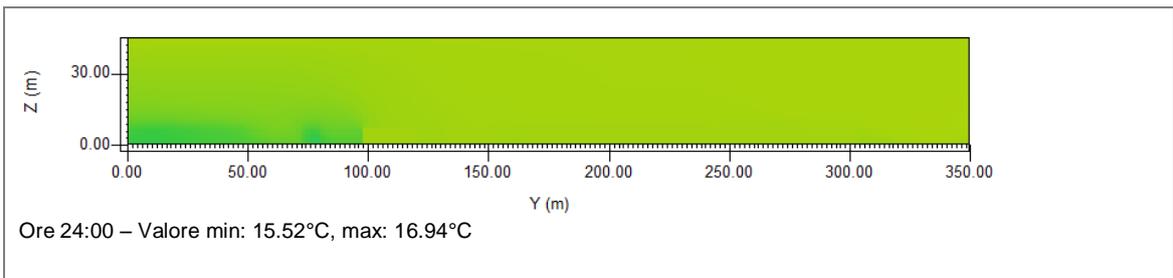


Figura 7.36: rappresentazione oraria della temperatura potenziale relativa alla sezione effettuata in corrispondenza di X (m) = 160 per lo scenario 'stato di fatto' in data 24/10/14.

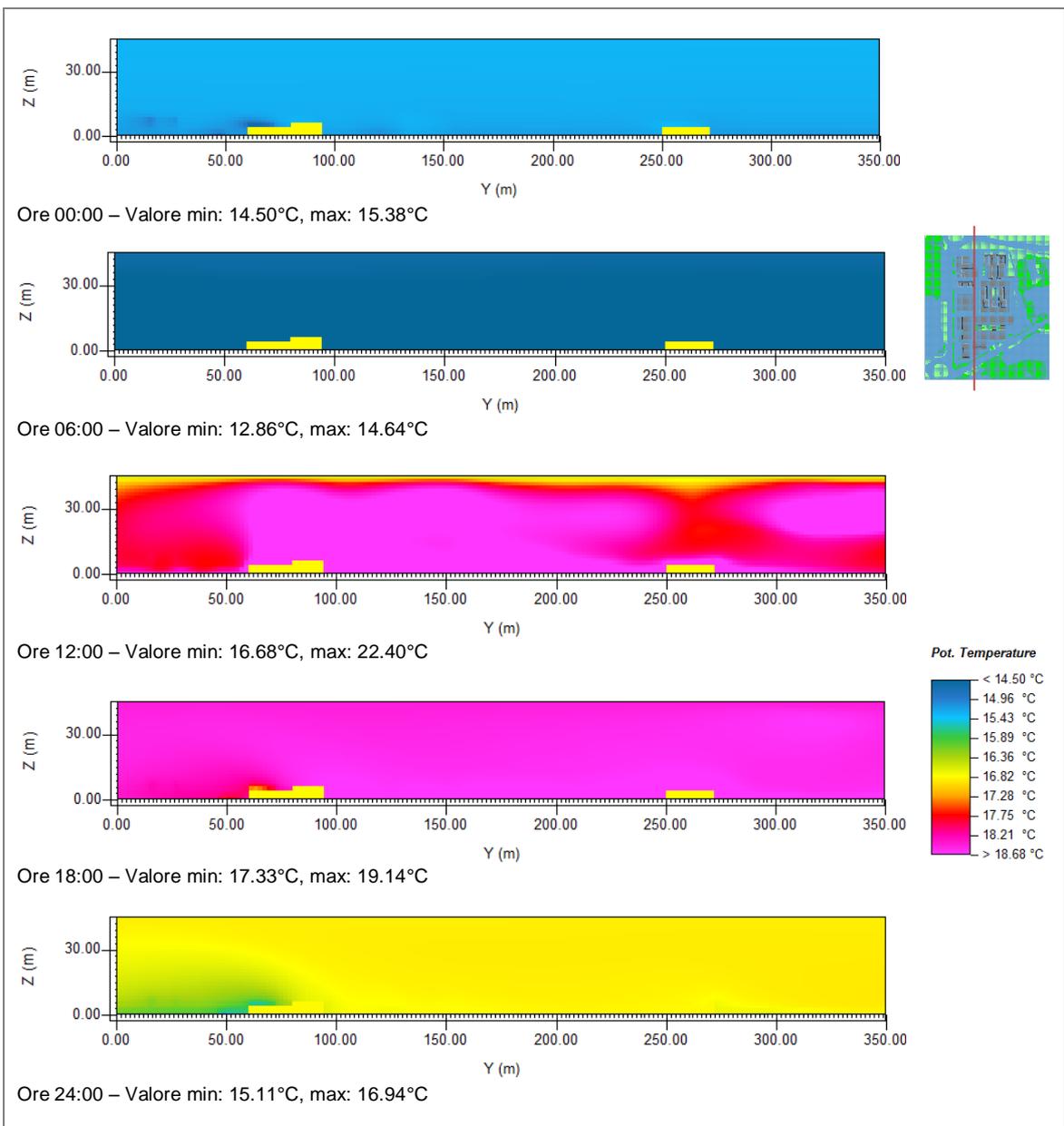


Figura 7.37: rappresentazione della temperatura potenziale relativa alla sezione effettuata in corrispondenza di X (m) = 120 per lo stato di fatto in data 24/10/14.

percepibile chiaramente attorno alle 18:00, orario per cui esso si mostra a circa 2°C in meno rispetto il contesto alla medesima quota. L'effetto rinfrescante della copertura inverdita rimane evidente fino alla mezzanotte, perdendosi quindi solo nelle ore centrali più calde.

Procedendo con il raffronto tra l'ambiente simulato e quello che viene effettivamente registrato dalla strumentazione presente sul tetto, è stato possibile notare in che modo la temperatura potenziale reale si discostasse da quella frutto di ENVI-met. Confrontando i dati medi orari relativi alla settimana di ottobre incentrata nel 24/10/14 (Figura 7.38), si può infatti vedere come i valori che ENVI-met fornisce in output rientrino tra il primo ed il terzo quartile fino alle 17:00. Da quest'ora in poi, invece, il programma sovrastima la temperatura.

Valutando il coefficiente di determinazione tra la temperatura potenziale reale e quella simulata, esso risulta pari a 0.67, quindi l'indice di correlazione di Pearson tra le due variabili è pari a 0.82, risultando leggermente inferiore al valore ottenuto per la giornata del 19/07/14 (Figura 7.39). Questo ci consente di affermare che, nonostante le differenze finali, la simulazione ha effettivamente descritto correttamente l'andamento delle temperature in data 24 Ottobre.

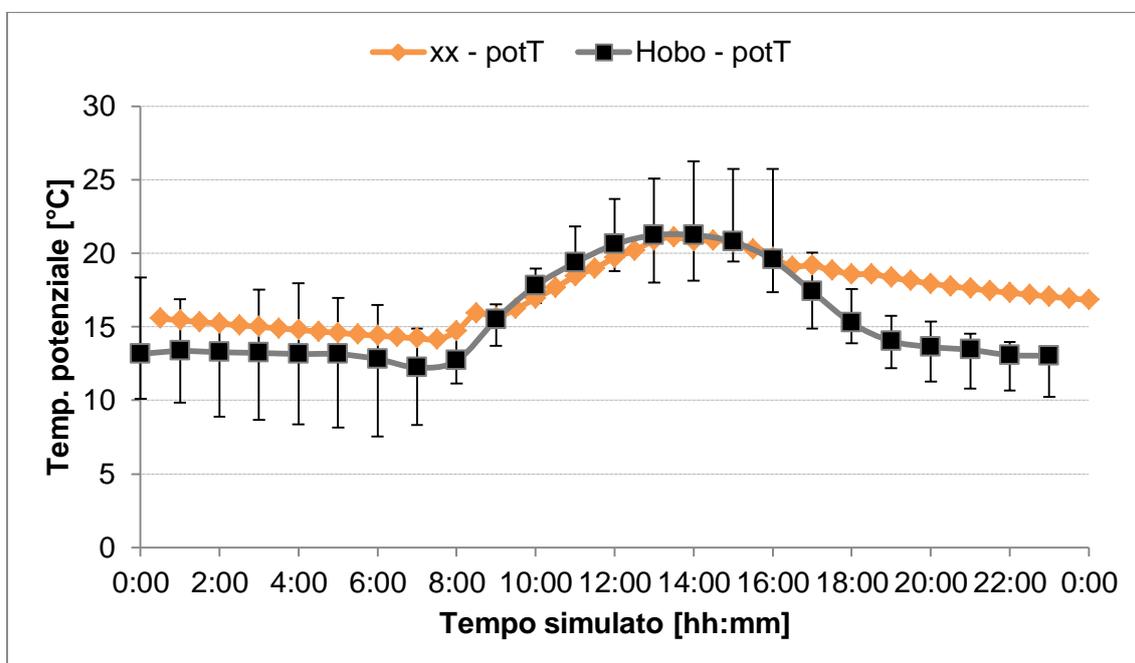


Figura 7.38: confronto tra la temperatura potenziale simulata da ENVI-met e quella reale registrata nella settimana incentrata nel 24 Ottobre dalla stazione Hobo. Le barre d'errore rappresentano il primo ed il terzo quartile, il valore centrale la mediana.

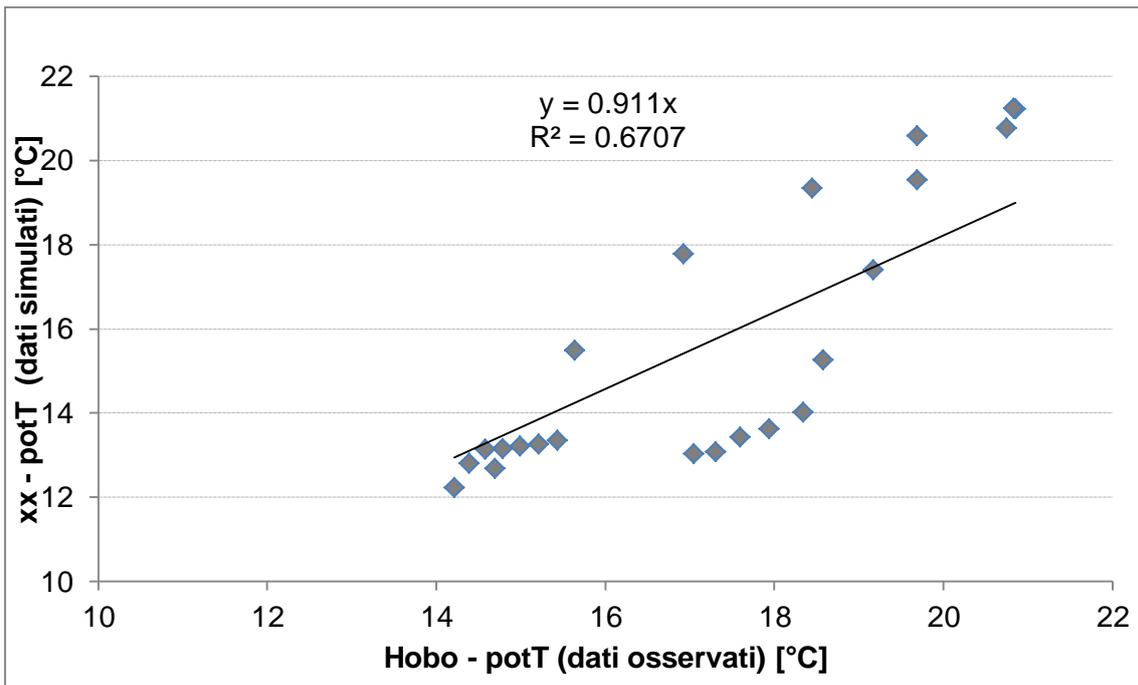


Figura 7.39: correlazione tra le temperature potenziali registrate dalla stazione Hobo e quelle simulate da ENVI-met

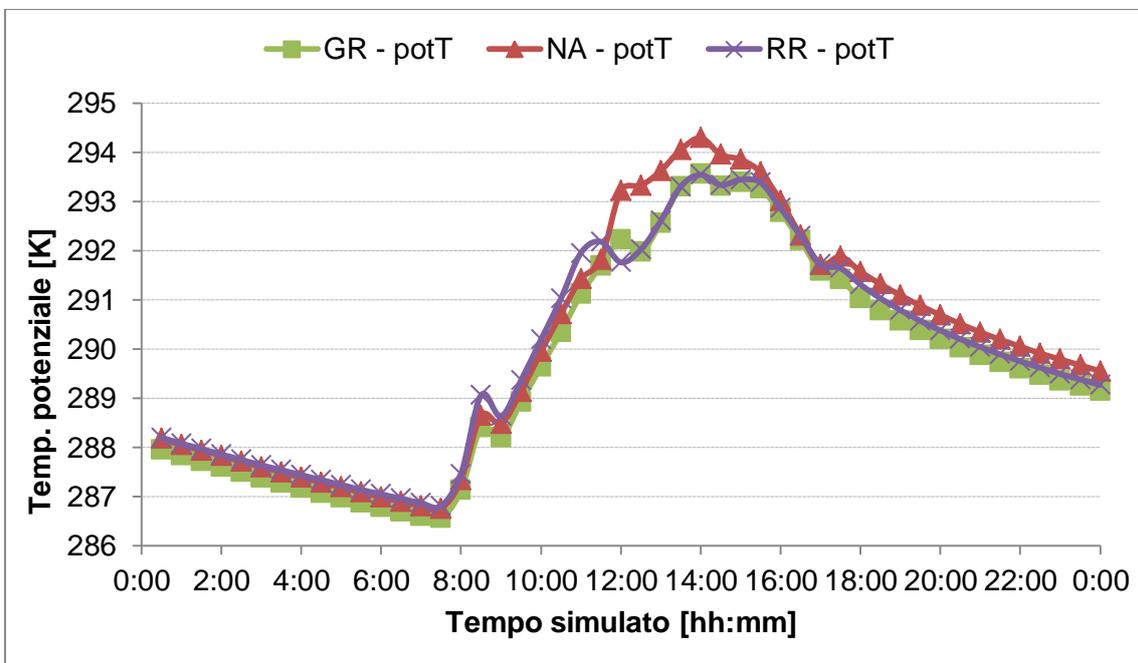


Figura 7.40: andamento della temperatura potenziale registrata in corrispondenza del Reference, del Native e del Green Roof registrata tramite l'ausilio di tre punti ricettori in data 24/10/14.

Per quanto concerne i tre ricettori disposti in corrispondenza del Reference, del Native e del Green Roof, tramite il grafico di Figura 7.40 è possibile notare come ENVI-met faccia fatica a differenziare le tre zone anche in questo caso, per le ragioni già esplicitate nel capitolo 7.4.1.3.

La guaina bituminosa risulta paradossalmente più fresca dei tetti verdi fino alle 11:30. Da quest'orario in avanti il Native si riconferma essere la tipologia di copertura più calda, così come accadeva in data 19 Luglio, discostandosi dai risultati forniti dalle termocoppie. Nonostante il Sedum sia sempre più fresco del Reference, le considerazioni descritte pocanzi non consentono di ritenere validi tali dati in output.

7.4.6 Scenario 5: tetti verdi a Sedum in data 19/07/14

7.4.6.1 L'Area Input File

Per l'Area Input File corrispondente a questo scenario è stato utilizzato nuovamente il file relativo alla configurazione numero due, in quanto rappresentativo dell'ipotesi 'tetti verdi a Sedum'.

7.4.6.2 Il Configuration File

Come per la seconda configurazione, anche in questo caso è stato differenziato il Configuration File relativo allo stato di fatto modificando i valori di trasmittanza e di albedo delle superfici.

Per tutte le considerazioni in merito ai valori riportati in Tabella 7.8 si rimanda al capitolo 7.4.5.2 e al 7.4.2.2.

Configuration File

Start Simulation at Day (DD.MM.YYYY):	= 24.10.2014
Start Simulation at Time (HH:MM:SS):	= 00:00:00
Total Simulation Time in Hours:	= 24.00
Save Model State each ? min	= 60
Wind Speed in 10 m ab. Ground [m/s]	= 0.3
Wind Direction (0:N..90:E..180:S..270:W..)	=47
Roughness Length z_0 at Reference Point	= 0.1
Initial Temperature Atmosphere [K]	= 288.5
Specific Humidity in 2500 m [g Water/kg air]	= 3

Relative Humidity in 2m [%]	= 65.4
[SOILDATA]	
Initial Temperature Upper Layer (0-20 cm) [K]	= 288
Initial Temperature Middle Layer (20-50 cm) [K]	= 288
Initial Temperature Deep Layer (below 50 cm)[K]	= 288
Relative Humidity Upper Layer (0-20 cm)	= 47.8
Relative Humidity Middle Layer (20-50 cm)	= 57.8
Relative Humidity Deep Layer (below 50 cm)	= 57.8
[BUILDING]	
Inside Temperature [K]	= 295
Heat Transmission Walls [W/m ² K]	= 3.5
Heat Transmission Roofs [W/m ² K]	= 0.67
Albedo Walls	= 0.5
Albedo Roofs	= 0.2

Tabella 7.8: valori inseriti all'interno del Configuration File relativo allo scenario "tutti tetti verdi a Sedum" in data 24/10/14. In grassetto sono evidenziati i valori modificati rispetto allo scenario 4.

7.4.6.3 I risultati

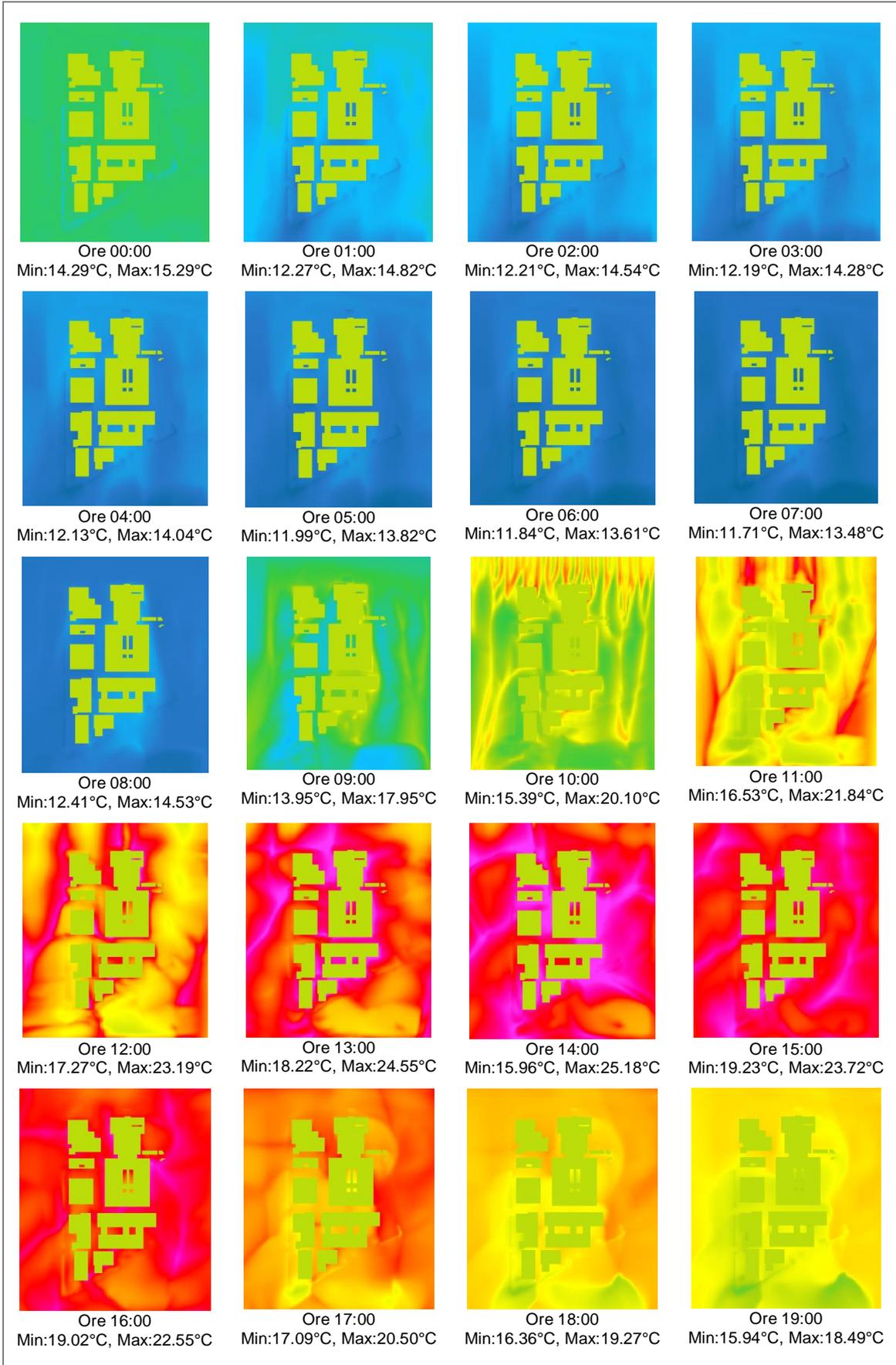
In Figura 7.41 si riportano le termografie orarie effettuate a 1.35 m dal suolo.

La simulazione a livello grafico non si discosta molto da quella relativa allo scenario 'stato di fatto'; difatti, a fare la differenza non è tanto la distribuzione oraria di temperatura, quanto i valori registrati. Si invita pertanto il lettore a prestare attenzione alla scala termica riportata in legenda, che è leggermente diversa da quella di Figura 7.37.

Ancora una volta, infatti, fino alle 08:00 le temperature potenziali appaiono in calo e pressoché stazionarie, mostrando variazioni massime orarie di circa un paio di gradi.

Dalle 09:00 avvengono i primi cambiamenti veramente percepibili: la temperatura dall'aria inizia ad alzarsi e continua ad aumentare fino a raggiungere i valori massimi (25.18°C) in corrispondenza delle 14:00. Dalle 17:00 in poi si nota come, invece, la temperatura diminuisca fino a raggiungere circa i 17°C alla mezzanotte successiva.

Per valutare l'effetto isola di calore ci si avvale delle sezioni effettuate in corrispondenza di X = 160 m rappresentate in Figura 7.42.



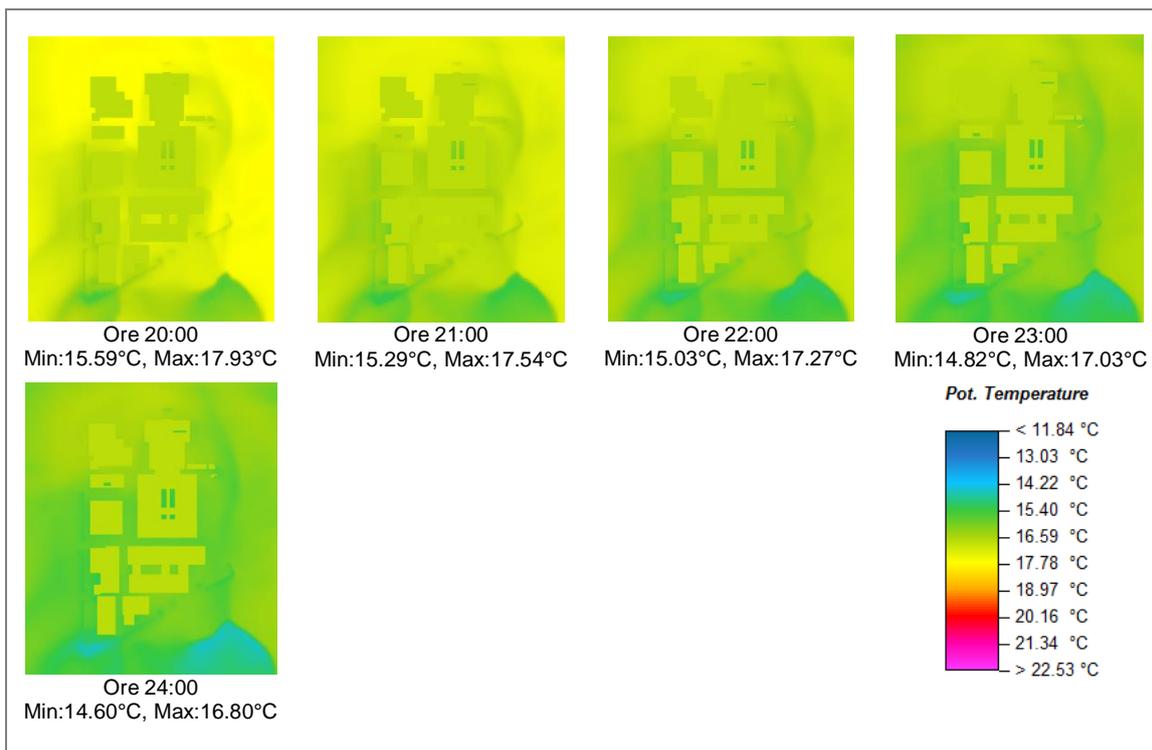
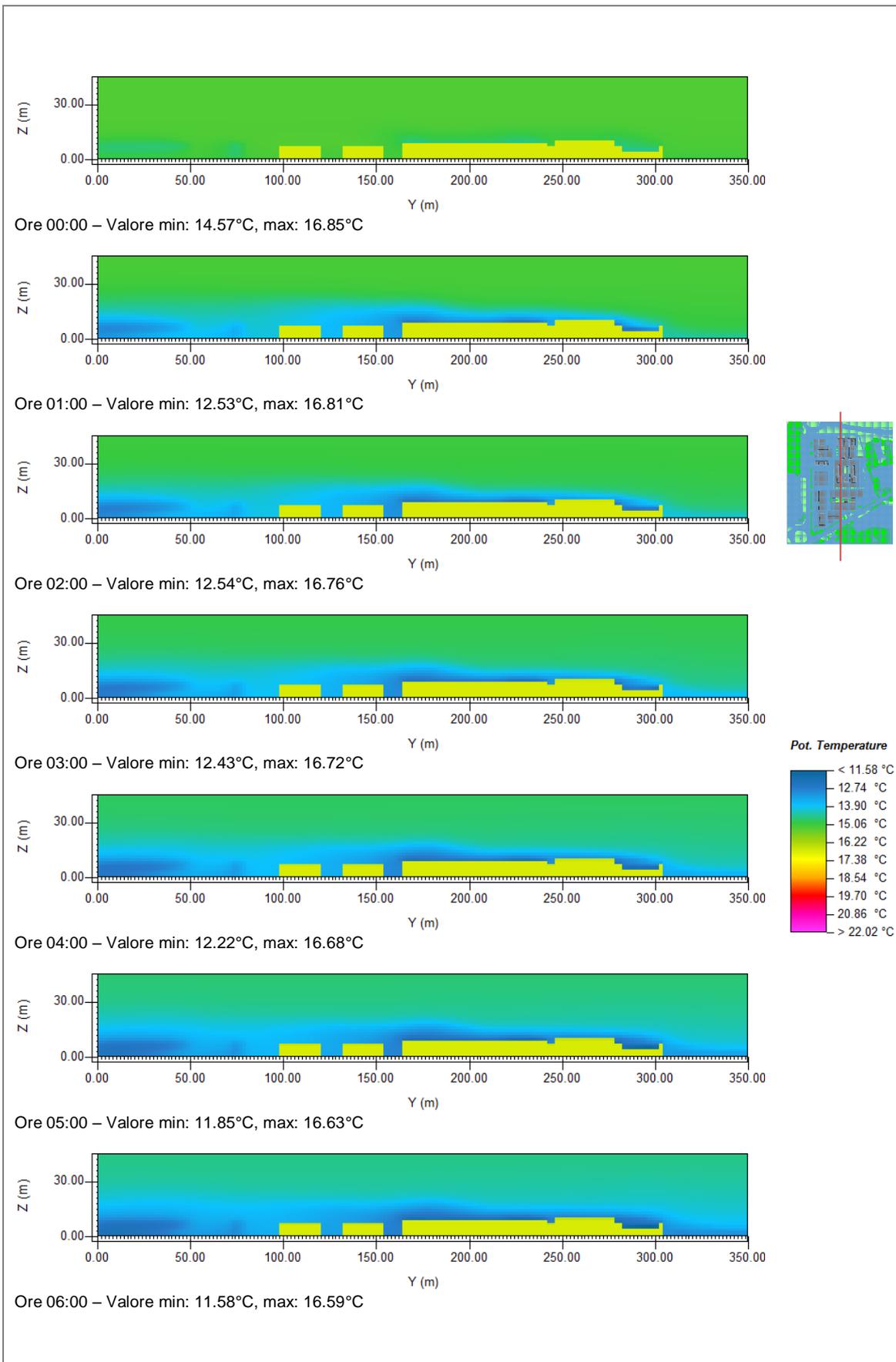


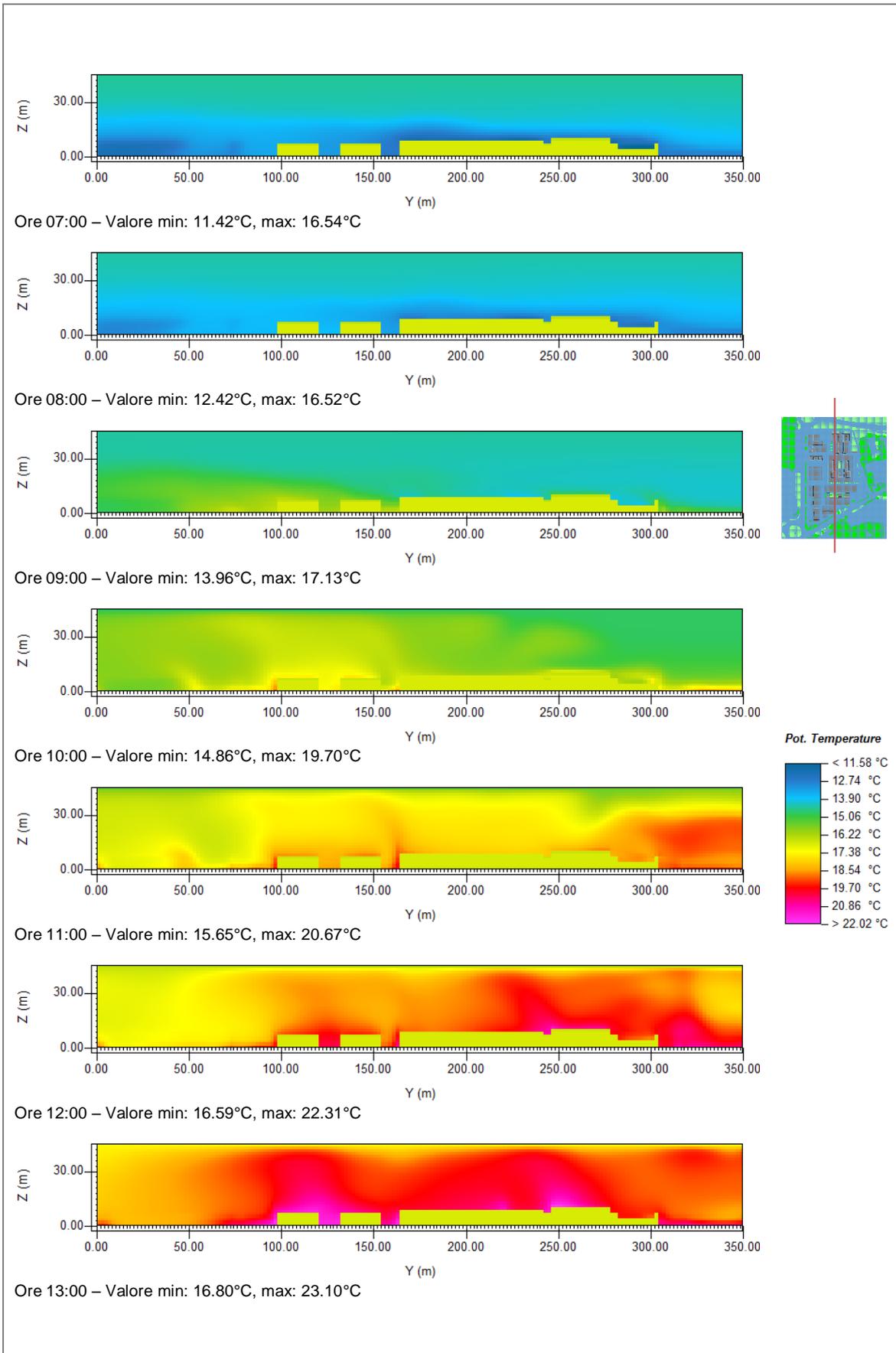
Figura 7.41: rappresentazione oraria della temperatura potenziale relativa alla quota di 1.35 m dal suolo per lo scenario 5 corrispondente allo stato 'tutti tetti verdi a Sedum' in data 24/10/14.

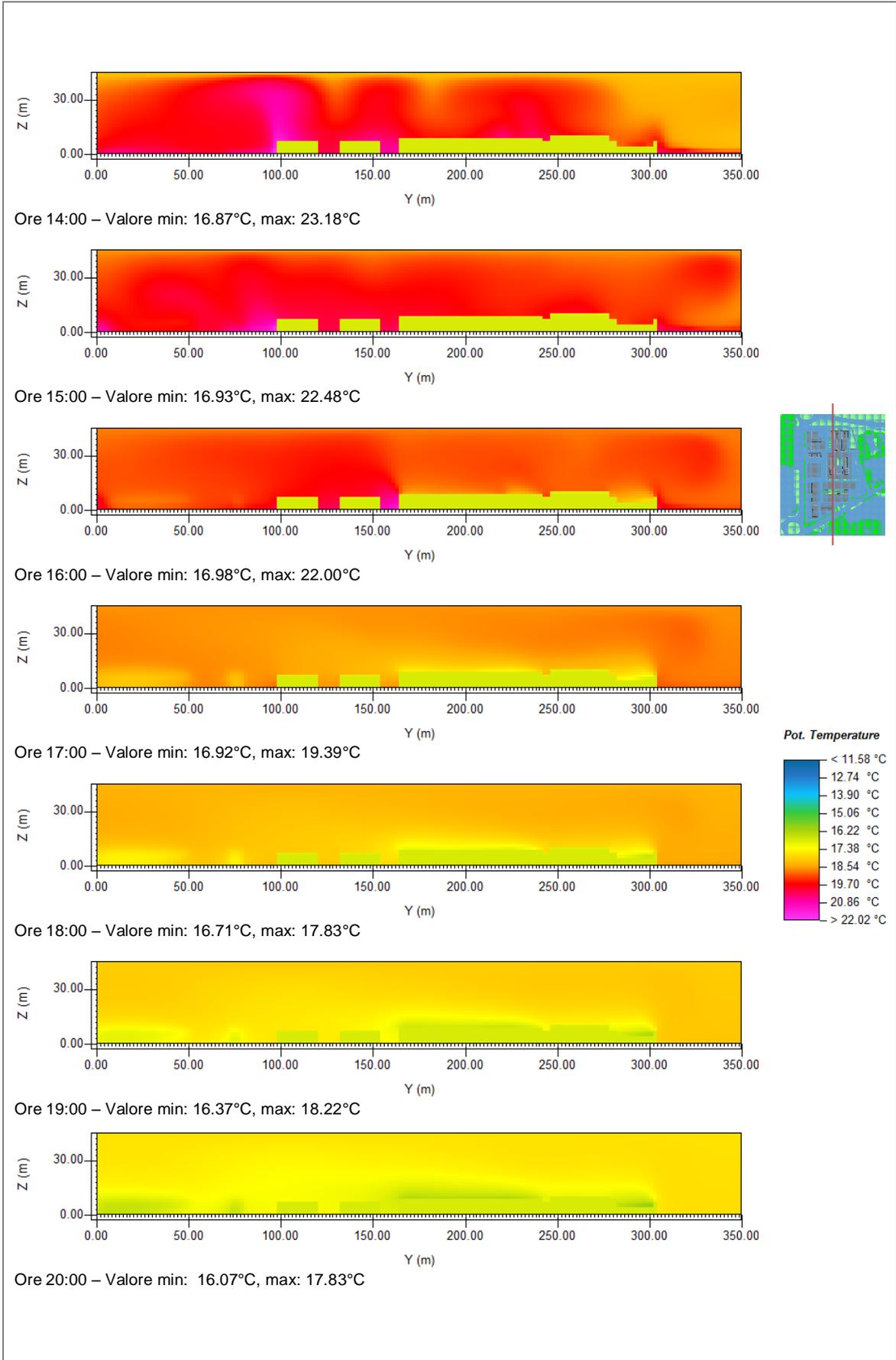
Dalle immagini si evince come durante la notte, in corrispondenza delle coperture, si presentino temperature più fresche a causa del rilascio di umidità da parte della vegetazione; tale effetto si estende fino a circa 12 m dalle coperture. Si ricorda che l'isola di calore atmosferica è un fenomeno prevalentemente notturno, pertanto il raffrescamento è percepibile fino alle 08:00.

Alle prime ore del giorno questo effetto scompare lasciando spazio a temperature più alte, ma comunque inferiori rispetto a quelle dello scenario numero quattro. Le temperature maggiori vengono raggiunte tra le 13:00 e le 16:00 e le zone più calde sono quelle centrali del lotto e quelle sottovento rispetto agli edifici.

Dalle 17:00 le temperature appaiono in calo, ma l'effetto dei tetti verdi a Sedum è sempre percepibile in quanto si verificano temperature di circa 1°C inferiori rispetto il contesto. È inoltre possibile notare come l'effetto rinfrescante coinvolga dalle 18:00 alle 19:00 l'area sovrastante di circa 7.5 m e con l'abbassarsi delle temperature questo si estenda sempre più fino a raggiungere un'estensione massima di circa 20 m alle 24:00.







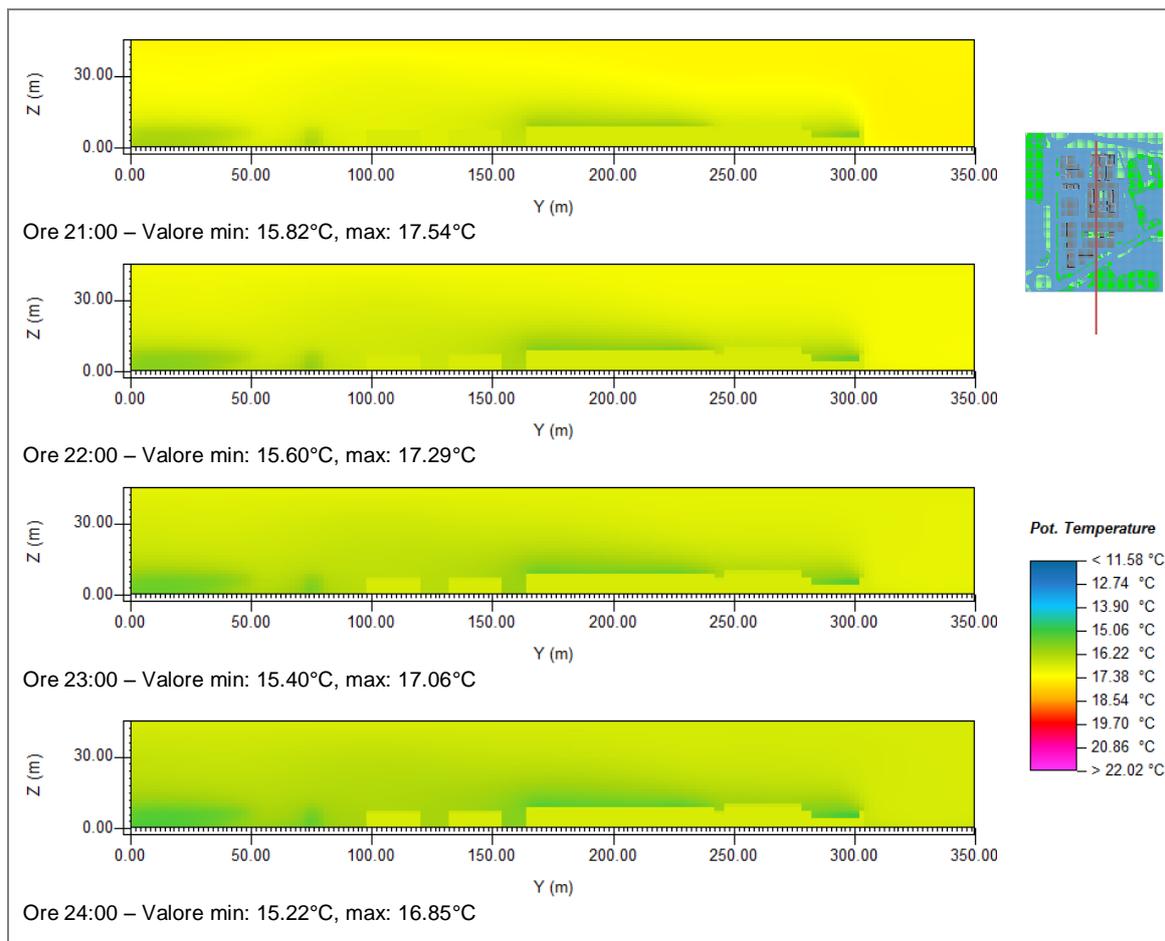


Figura 7.42: rappresentazione oraria della temperatura potenziale relativa alla sezione effettuata in corrispondenza di X (m) = 160 per lo scenario 'tutti tetti verdi a Sedum' in data 24/10/14.

7.4.7 Scenario 6: tetti verdi autoctoni in data 20/10/14

7.4.7.1 L'Area Input File

Per l'Area Input File corrispondente a questo scenario è stato utilizzato nuovamente il file relativo alla configurazione numero tre, in quanto rappresentativo dell'ipotesi 'tetti verdi autoctoni'.

7.4.7.2 Il Configuration File

Trattandosi sempre del medesimo pacchetto fornito dalla Harpo, anche per questo scenario è stato utilizzato il Configuration File con le modifiche apportate in Tabella 7.8. Le simulazioni saranno comunque differenziate l'una dall'altra grazie alla vegetazione disposta in copertura, le cui caratteristiche sono elencate in Tabella 7.2.

7.4.7.3 I risultati

In Figura 7.43 si riportano le termografie orarie effettuate a 1.35 m dal suolo.

Ancora una volta la simulazione a livello grafico non si discosta particolarmente da quella relativa allo scenario 'stato di fatto'; difatti, a fare la differenza non è tanto la distribuzione oraria di temperatura, quanto i valori registrati. Si invita pertanto il lettore a prestare attenzione alla scala termica riportata in legenda, che è leggermente diversa da quella di Figura 7.37.

Anche in questo caso, infatti, fino alle 08:00 le temperature potenziali appaiono in calo e pressoché stazionarie, mostrando variazioni massime orarie di circa un paio di gradi. Dalle 09:00 avvengono i primi cambiamenti veramente percepibili: la temperatura dall'aria inizia ad alzarsi e continua ad aumentare fino a raggiungere i valori massimi (25.52°C) in corrispondenza delle 14:00. Dalle 17:00 in poi si nota come, invece, la temperatura diminuisca fino a raggiungere circa i 17°C alla mezzanotte successiva.

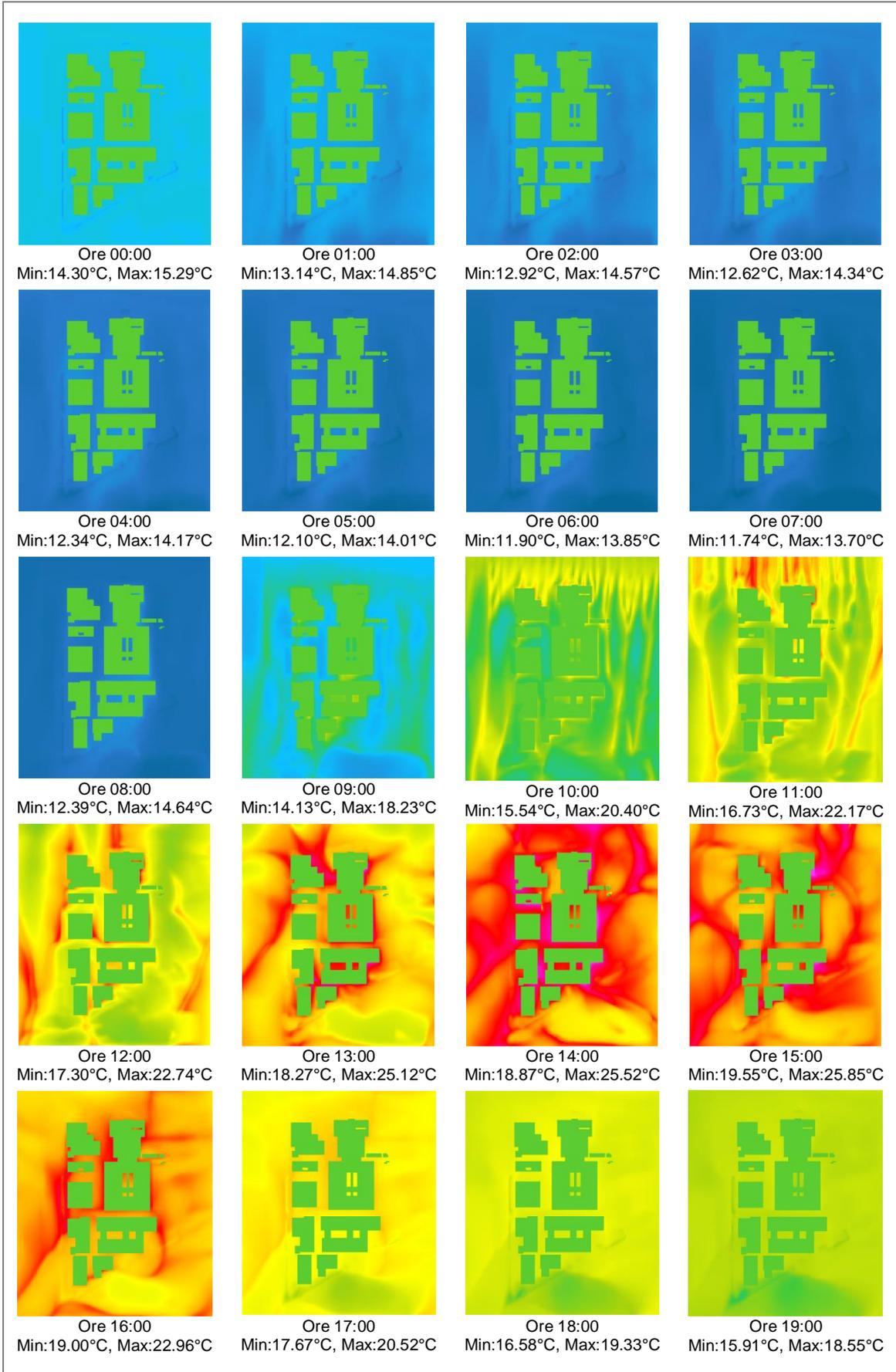
A livello planimetrico la simulazione non è particolarmente dissimile nemmeno dal quinto scenario. Infatti durante le ore iniziali (dalle 00:00 alle 08:00) le differenze nelle temperature massime registrate sono di circa 0.05°C, quindi del tutto trascurabili, mentre durante le ore centrali (dalle 12:00 alle 16:00) si rivela essere mediamente più caldo di soli 0.60°C. Infine alle 20:00 alle 24:00 le temperature massime sono in tutto e per tutto le medesime.

Per valutare l'effetto isola di calore ci si avvale delle sezioni effettuate in corrispondenza di $X = 160$ m rappresentate in Figura 7.44.

Dalle immagini si evince come durante la notte, in corrispondenza delle coperture, si presentino temperature più fresche a causa del rilascio di umidità da parte della vegetazione; tale effetto si estende fino a circa 12 m dalle coperture. Si ricorda che l'isola di calore atmosferica è un fenomeno prevalentemente notturno, pertanto il raffrescamento è percepibile fino alle 08:00.

Alle prime ore del giorno questo effetto scompare lasciando spazio a temperature più alte, ma comunque inferiori rispetto a quelle dello scenario numero quattro. Le temperature maggiori vengono raggiunte tra le 13:00 e le 16:00 e le zone più calde sono quelle centrali del lotto e quelle sottovento rispetto agli edifici.

Dalle 17:00 le temperature appaiono in calo, ma l'effetto dei tetti verdi autoctoni è sempre percepibile in quanto si verificano temperature di circa 1°C inferiori rispetto il contesto. È inoltre possibile notare come l'effetto rinfrescante coinvolga dalle 18:00 alle 19:00 l'area sovrastante di circa 7.5 m e con l'abbassarsi delle temperature questo si



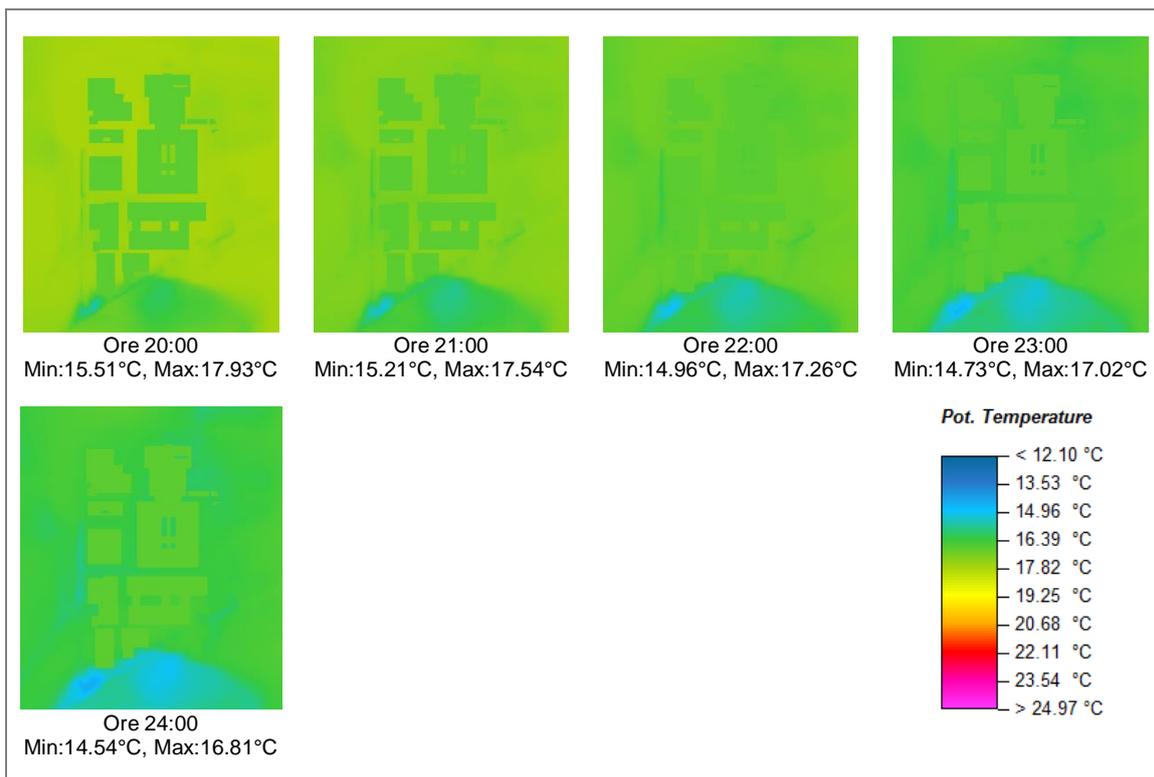
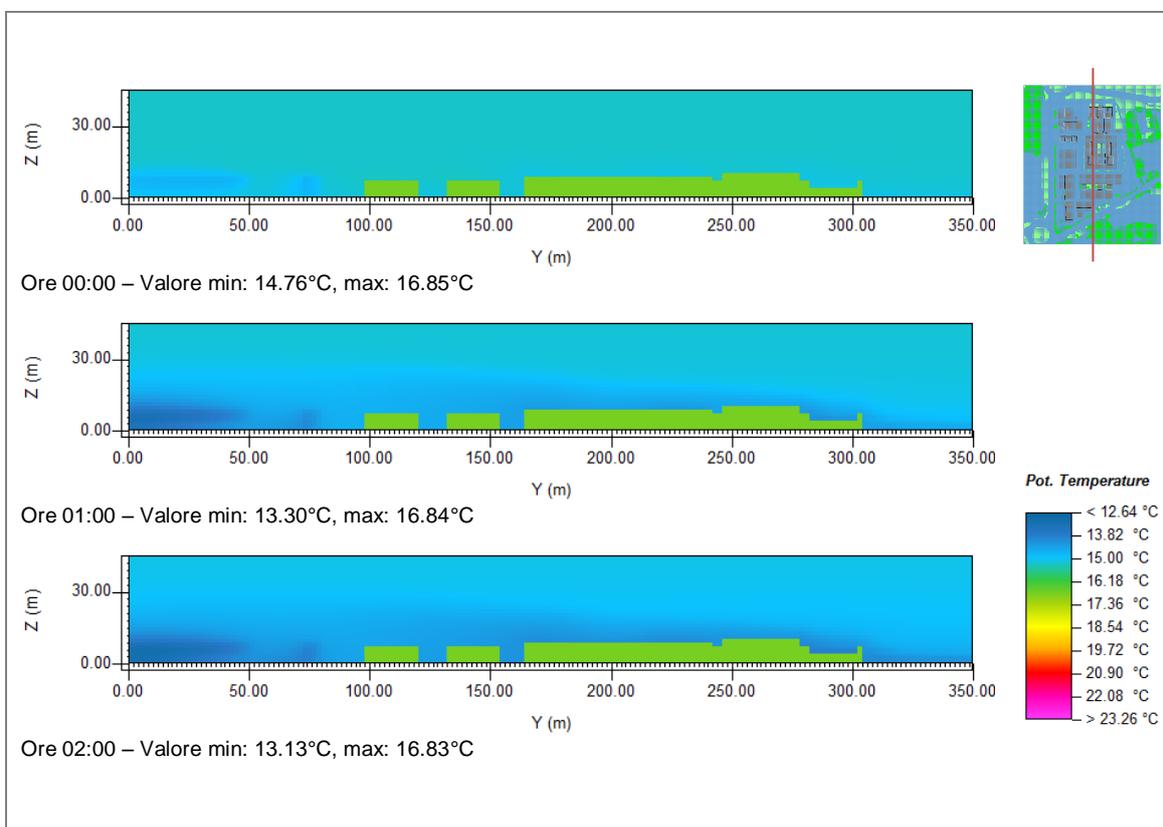
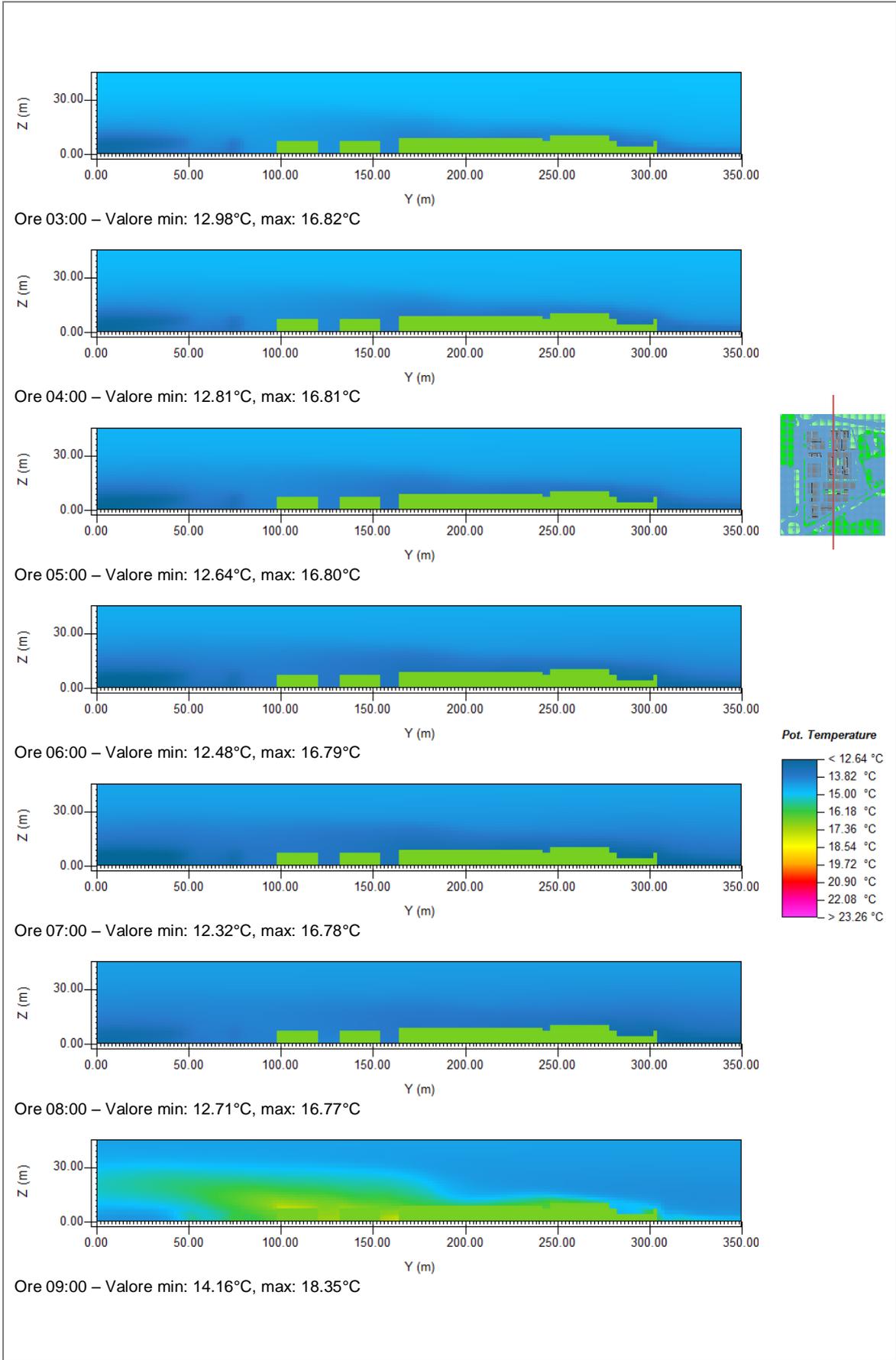
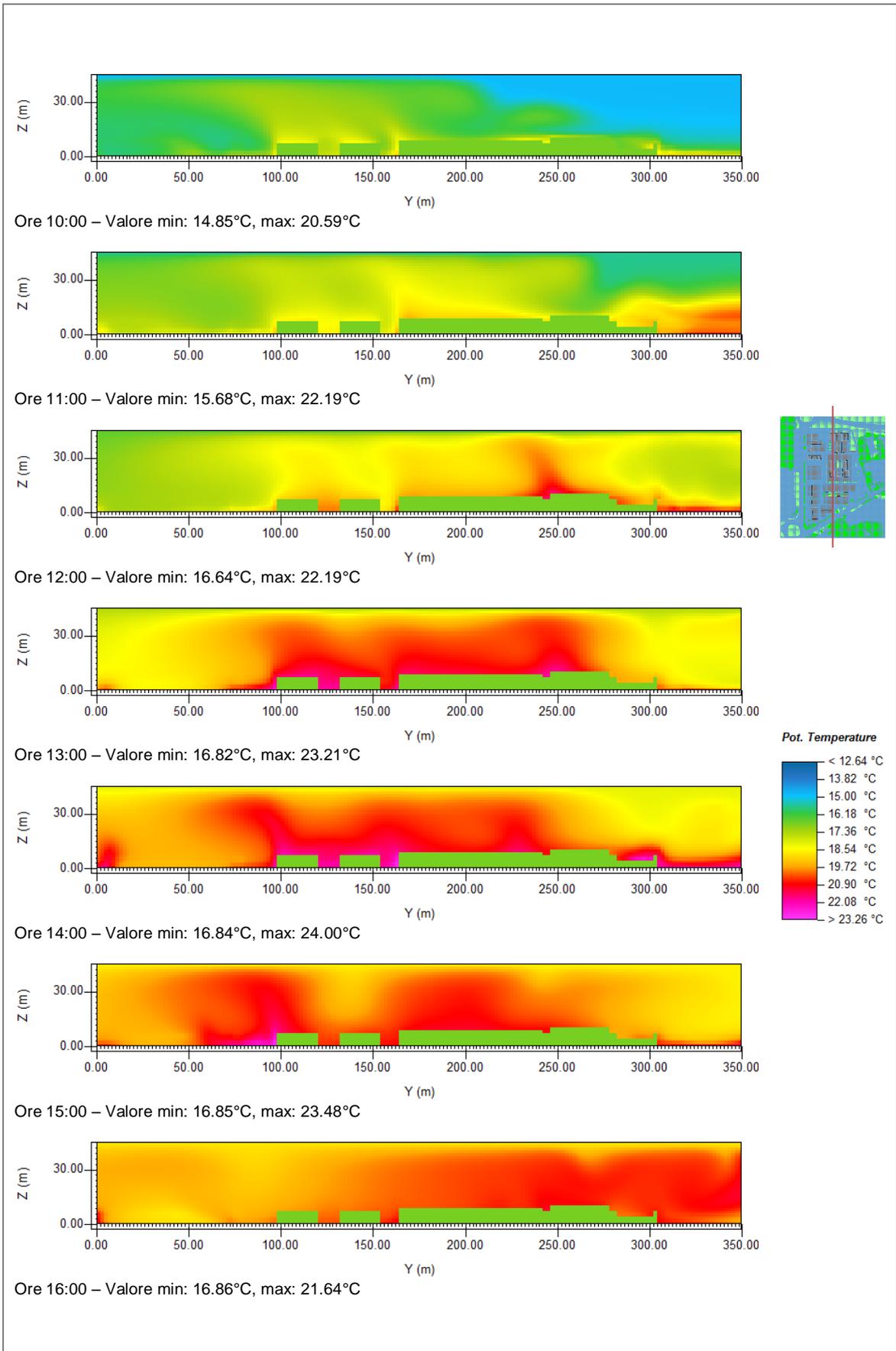
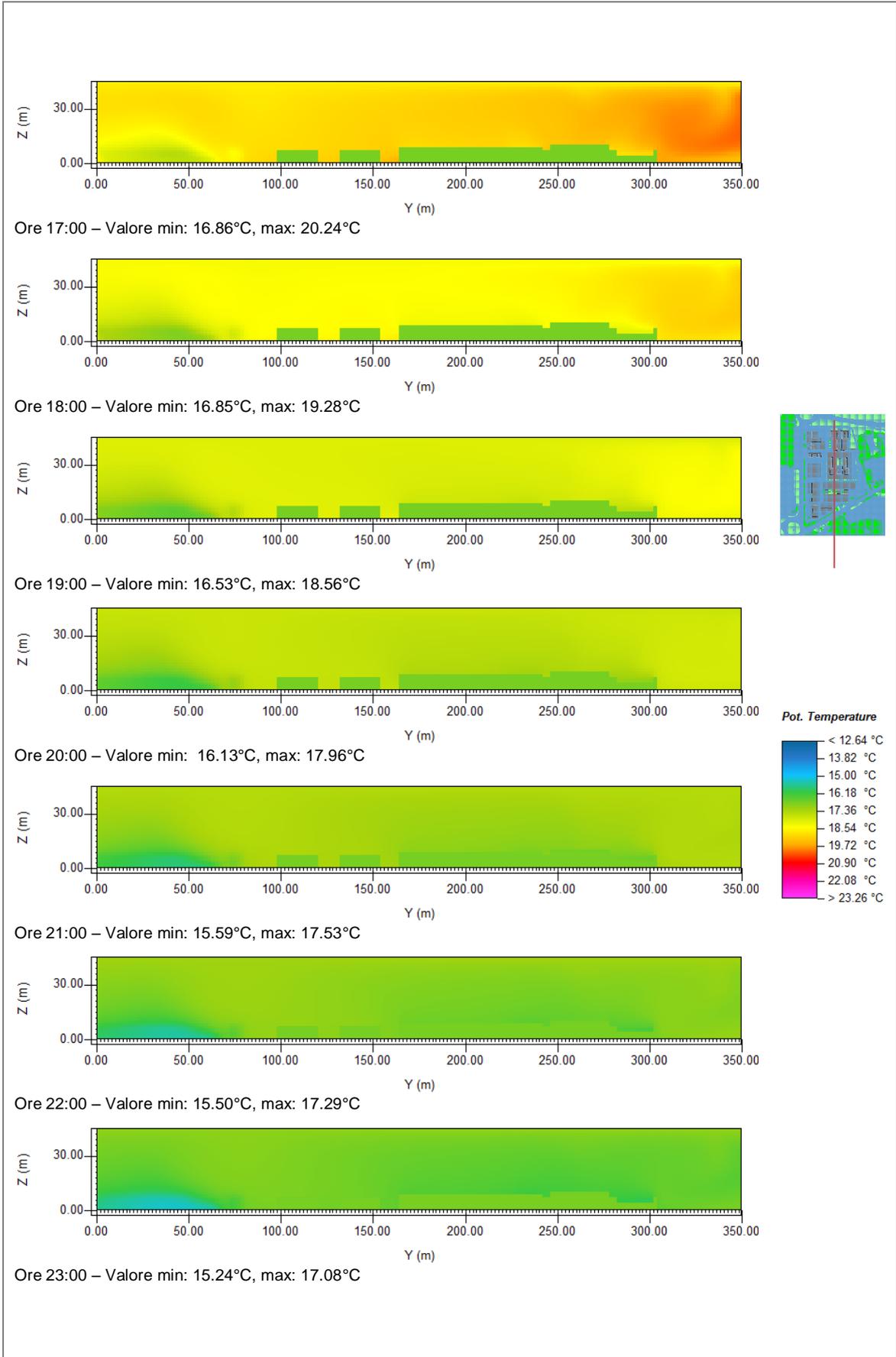


Figura 7.43: rappresentazione oraria della temperatura potenziale relativa alla quota di 1.35 m dal suolo per lo scenario 6 corrispondente allo stato 'tutti tetti verdi autoctoni' in data 24/10/14.









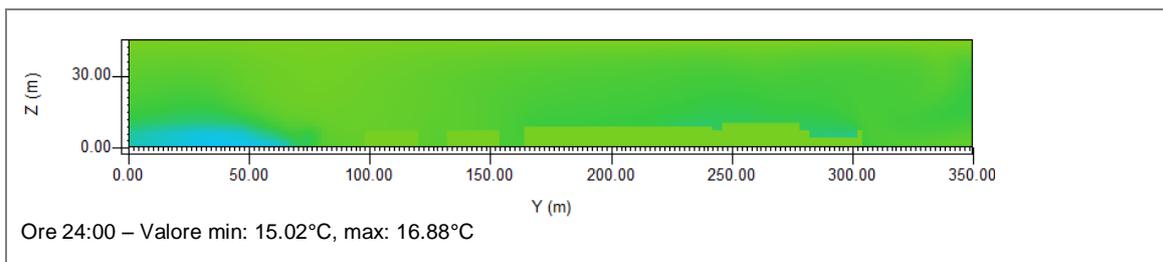


Figura 7.44: rappresentazione oraria della temperatura potenziale relativa alla sezione effettuata in corrispondenza di $X(m) = 160$ per lo scenario 'tutti tetti verdi autoctoni' in data 24/10/14.

estenda sempre più fino a raggiungere un'estensione massima di circa 20 m alle 24:00.

7.4.8 Confronti tra scenari in data 24/10/14

Così come effettuato per il 19 Luglio, si procede ora ad eseguire dei raffronti tra i tre scenari modellati per la data autunnale. Ancora una volta si è scelto di utilizzare come termine di paragone le configurazioni ipotetiche, pertanto valori positivi di gradiente termico implicano che la configurazione concernente lo stato di fatto è più calda rispetto a quella supposta.

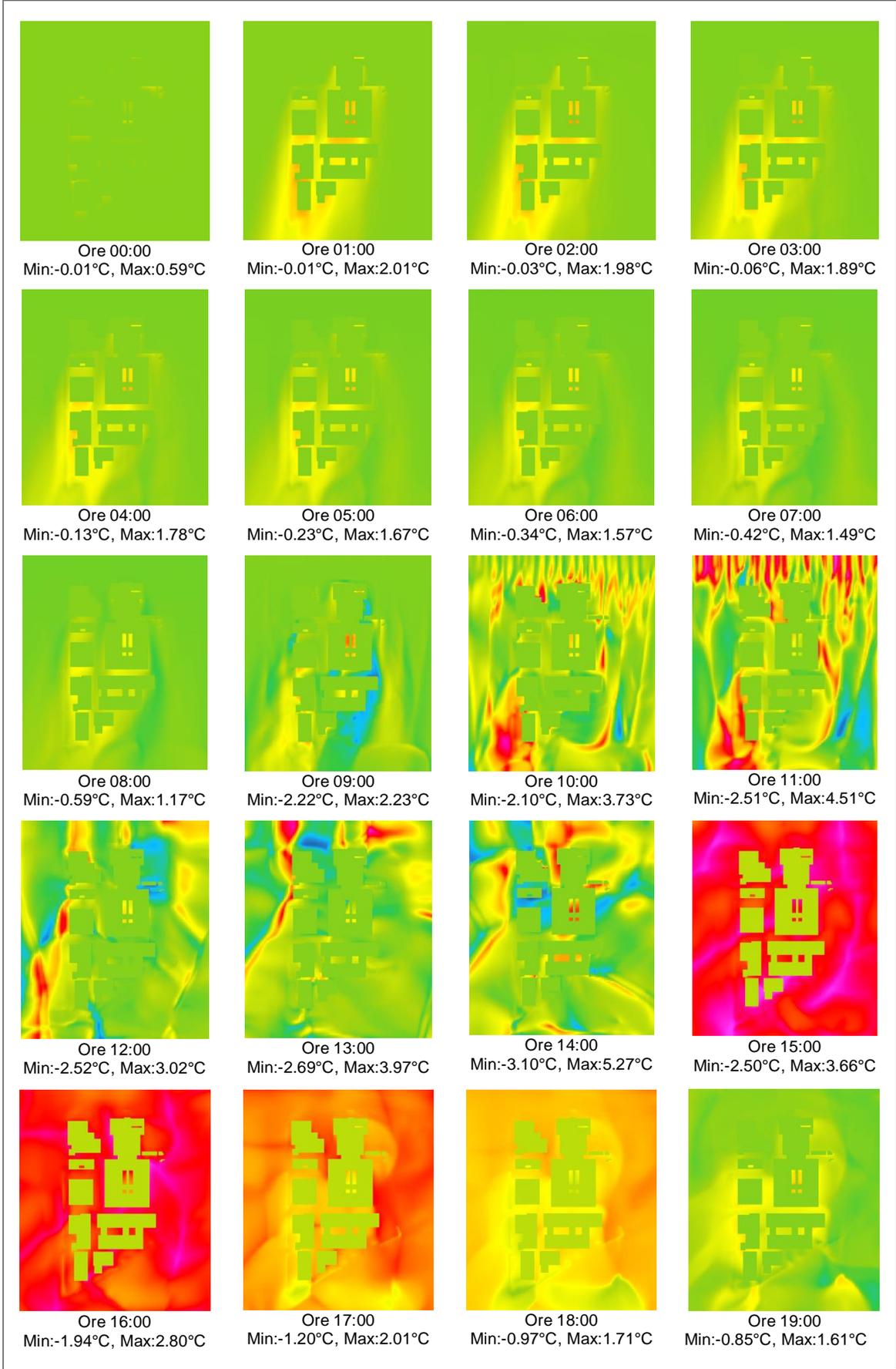
7.4.8.1 Confronto tra scenario 4 e 5

In primo luogo è stato effettuato un confronto orario a livello planimetrico e nello specifico facendo riferimento alla quota proposta per l'analisi dei singoli scenari, ovvero 1.35 m dal suolo (Figura 7.45).

I toni di verde indicano che le differenze tra i due scenari sono pressoché trascurabili. I colori caldi invece dimostrano che la configurazione attuale è più calda di quella con le coperture a Sedum, viceversa per i colori freddi.

Se l'inizializzazione non presenta alcun genere di difformità tra i due scenari, già dall'01:00 sono percepibili delle aree giallo-arancio nelle zone sottovento, così come nella corte interna dell'edificio principale. Questo comportamento si dimostra invariato fino alle 09:00, quando appaiono addirittura delle aree azzurre a sud-ovest rispetto ai laboratori.

Le differenze più evidenti sono, però, quelle che si hanno nelle ore più calde del giorno,



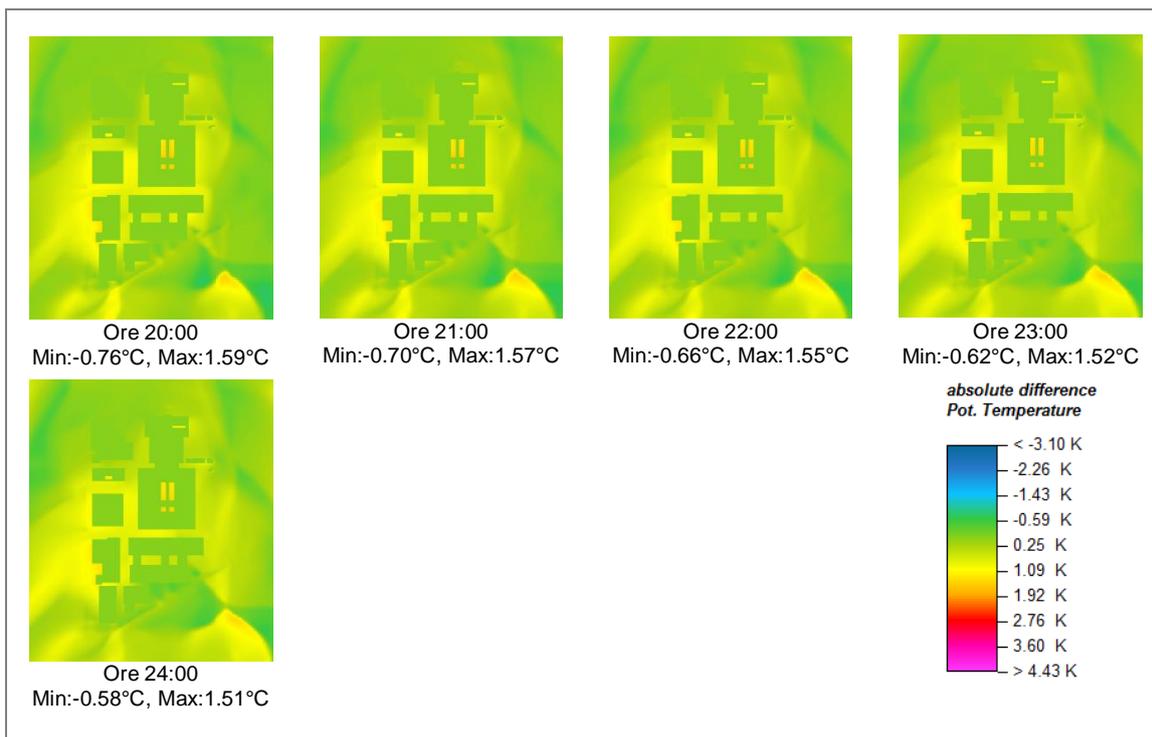


Figura 7.45: rappresentazione planimetrica oraria della differenza di temperatura potenziale tra il quarto ed il quinto scenario relativa alla quota di 1.35 m dal suolo

nello specifico dalle 14:00 alle 18:00, durante le quali si riscontrano temperature maggiori rispetto al quinto scenario in media di 2.55°C per l'intero plesso del Lazzaretto.

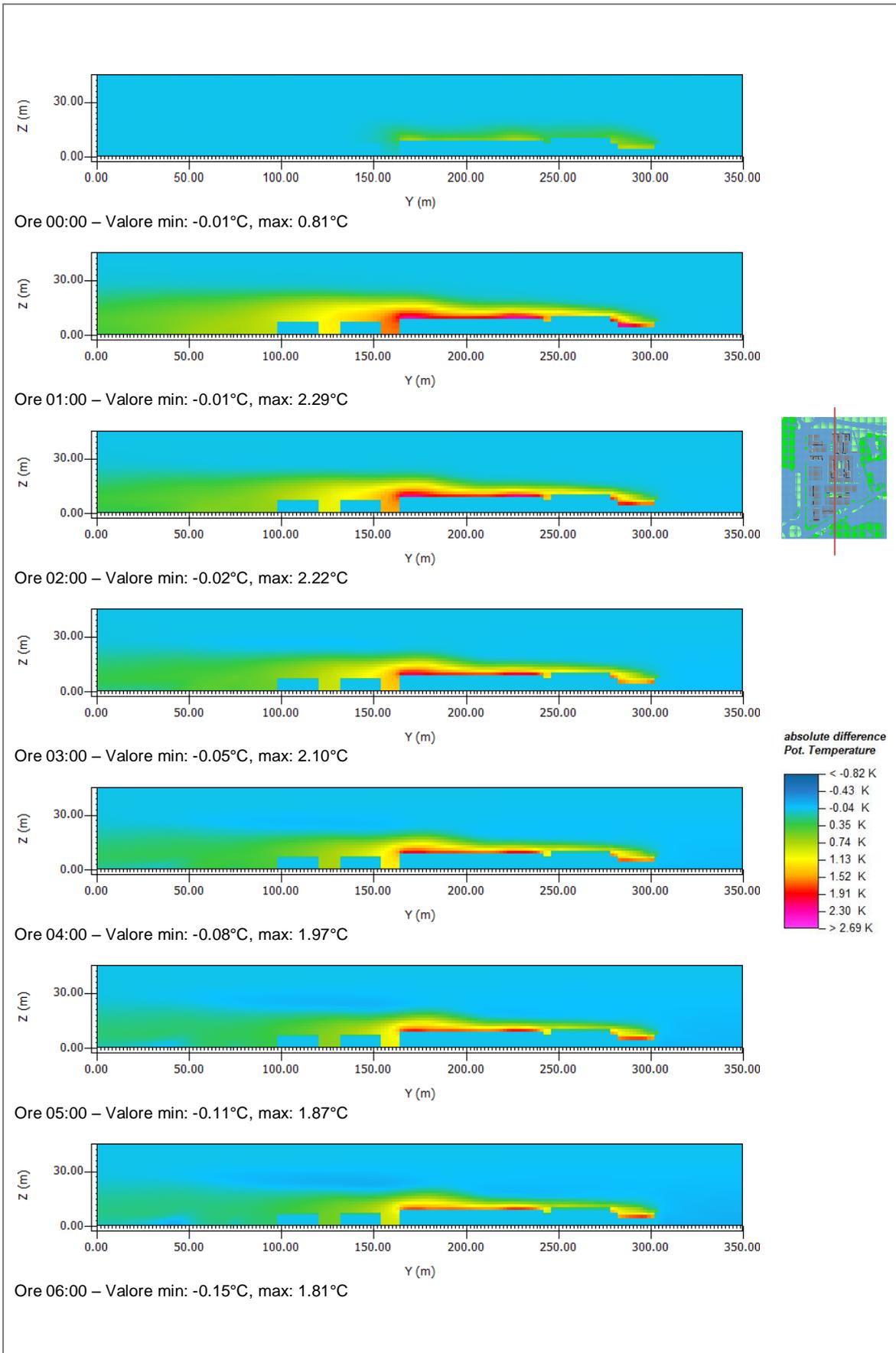
Dalle 19:00 fino al termine della simulazione le differenze sono attenuate, ma comunque pari a circa 1°C per tutte le aree prossime agli edifici.

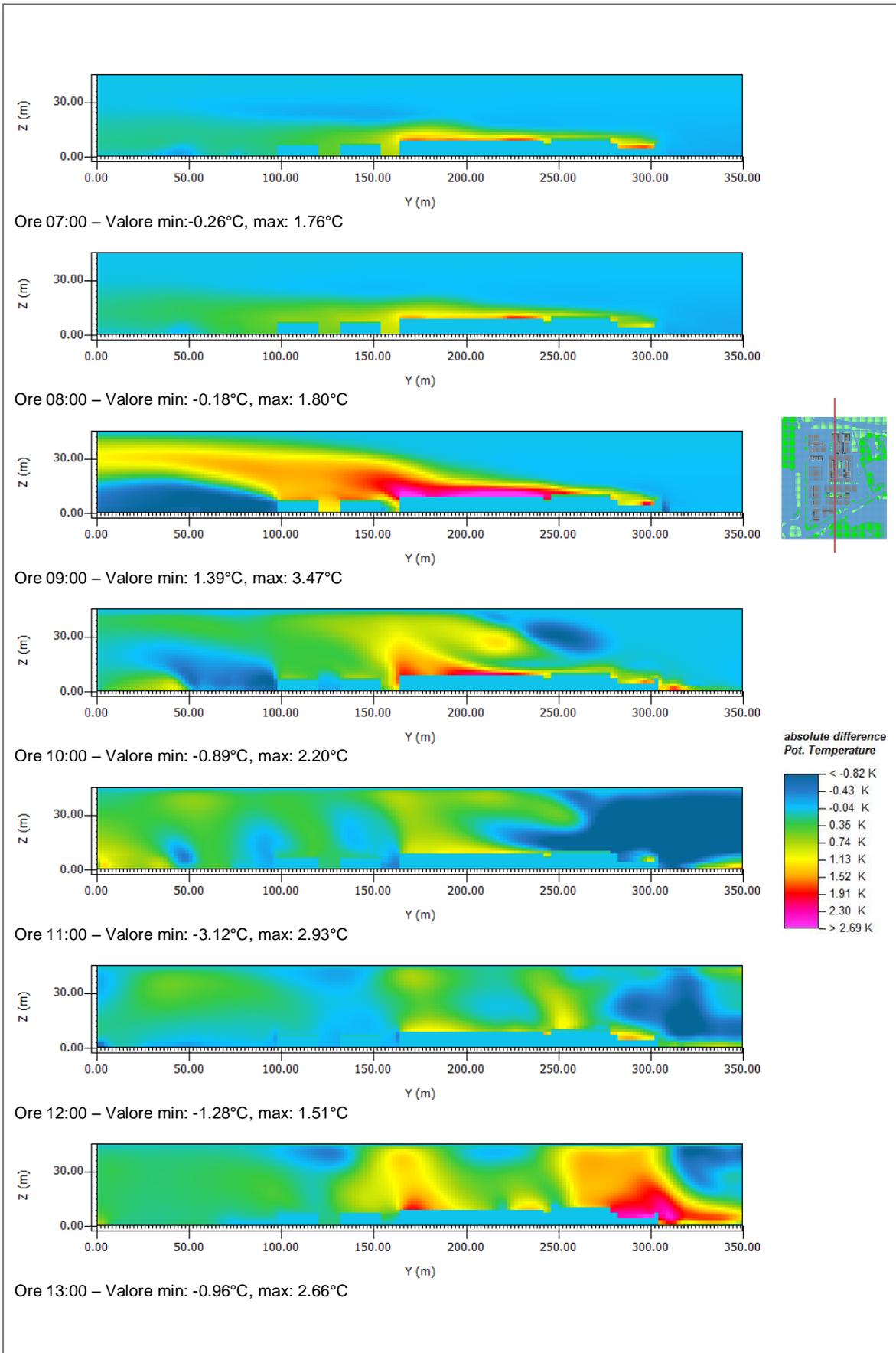
Per valutare i benefici nella lotta al fenomeno isola di calore ci si avvale dei confronti tra le sezioni effettuate in corrispondenza di $X = 160\text{ m}$ rappresentate in Figura 7.46.

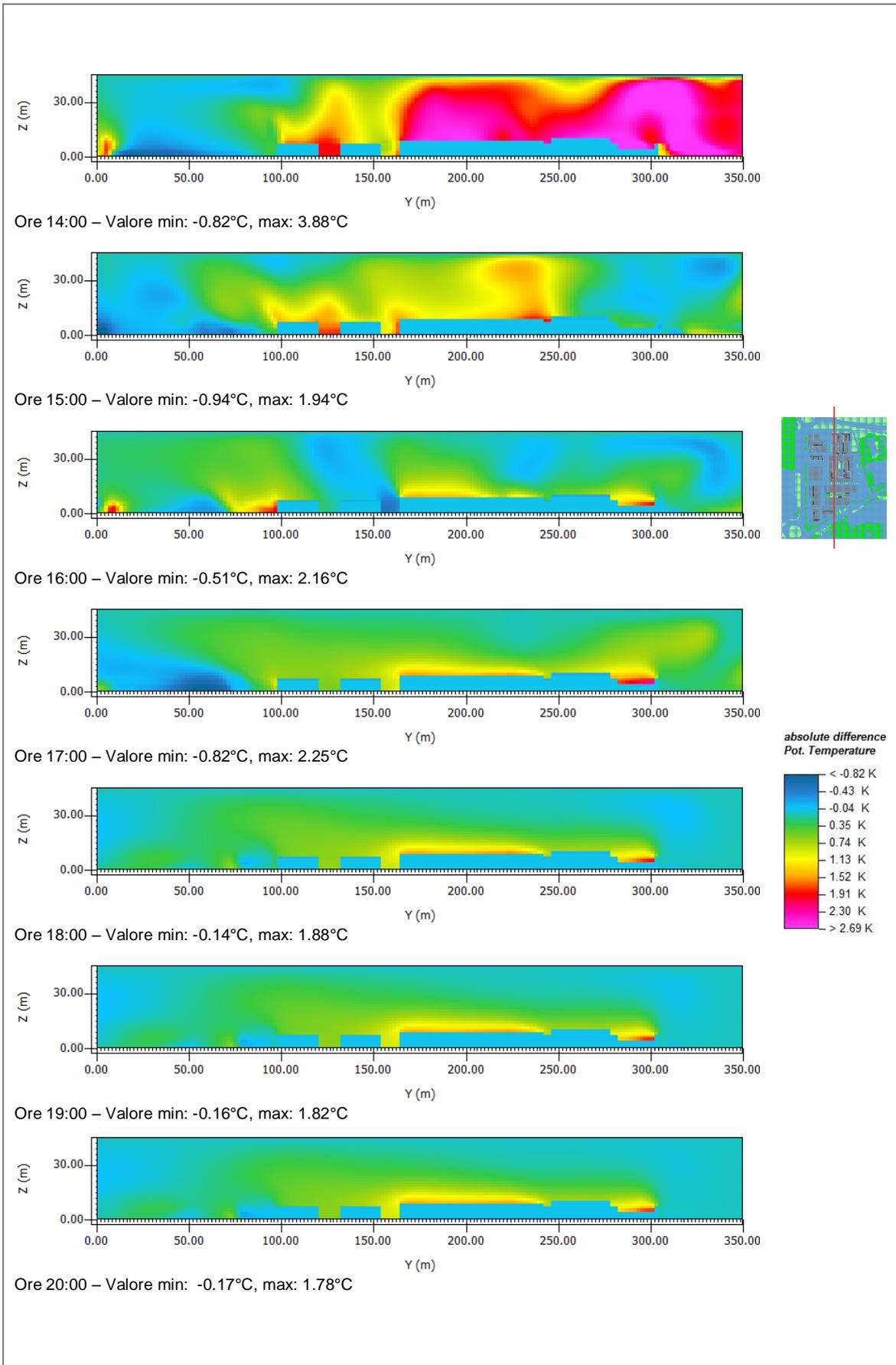
I toni di ciano indicano che le differenze tra i due scenari sono pressoché nulle. I colori dal verde al magenta invece dimostrano che la configurazione attuale è più calda di quella con le coperture a Sedum.

Già nelle prime ore del giorno si nota l'influenza della copertura verde sull'area dell'edificio principale e di quello dei dipartimenti. Infatti dalle 00:00 alle 08:00 è presente un alone giallo-rosso in questa zona che mette in luce la differenza tra i due scenari: lo stato attuale genera una temperatura potenziale superiore di circa 2°C .

Il massimo beneficio da parte delle coperture a Sedum si evidenzia per le 14:00 per cui la differenza massima tra i due scenari raggiunge i 3.88°C .







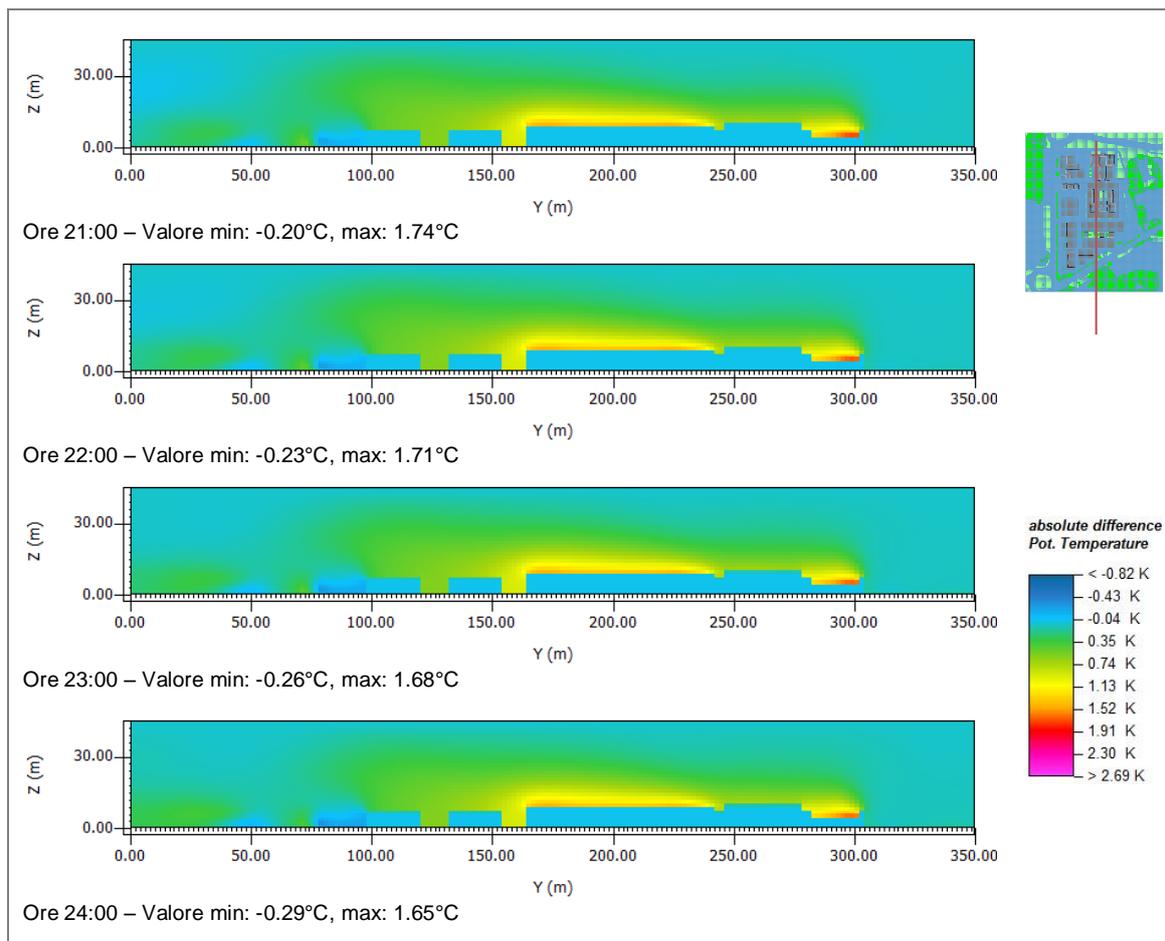


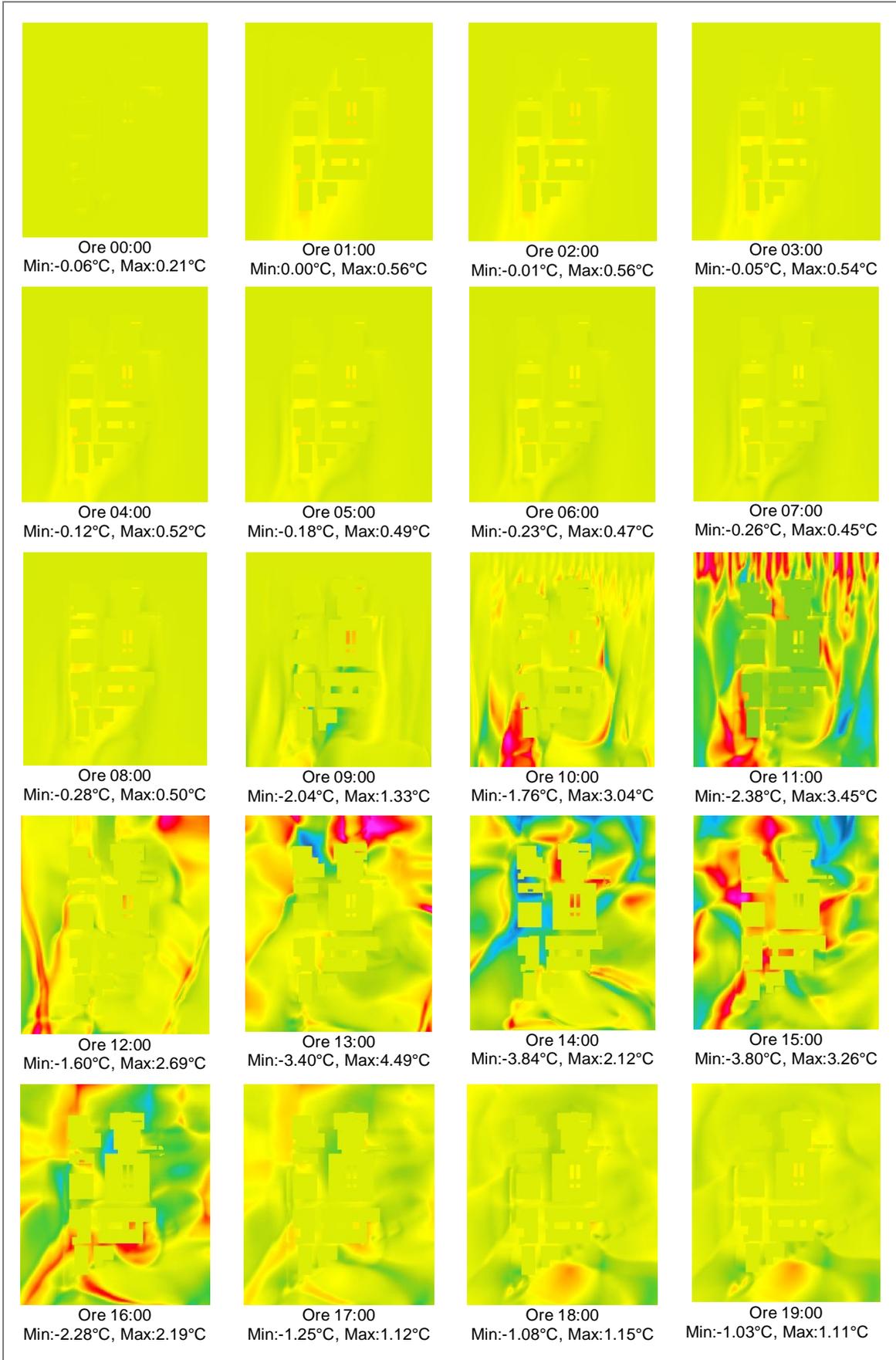
Figura 7.46: rappresentazione oraria della differenza di temperatura potenziale tra il quarto ed il quinto scenario relativa alla sezione per $X(m) = 160$. Valori positivi indicano che lo scenario 'stato di fatto' è più caldo rispetto alla soluzione 'tutti tetti verdi a Sedum'.

7.4.8.2 Confronto tra scenario 4 e 6

Anche per questo confronto si è ragionato prima a livello planimetrico e poi in alzato.

Si è quindi eseguita un'analisi oraria alla quota di 1.35 m dal suolo (Figura 7.47), riproponendo gli stessi valori in legenda di Figura 7.45 per agevolare ulteriori comparazioni.

Se l'inizializzazione non presenta alcun genere di difformità tra i due scenari esaminati, già dall'01:00 sono percepibili degli aloni gialli in corrispondenza delle aree sottovento, così come nella corte interna dell'edificio principale. Questo comportamento si dimostra invariato fino alle 09:00, quando appaiono addirittura delle aree azzurre a sud-ovest rispetto ai laboratori.



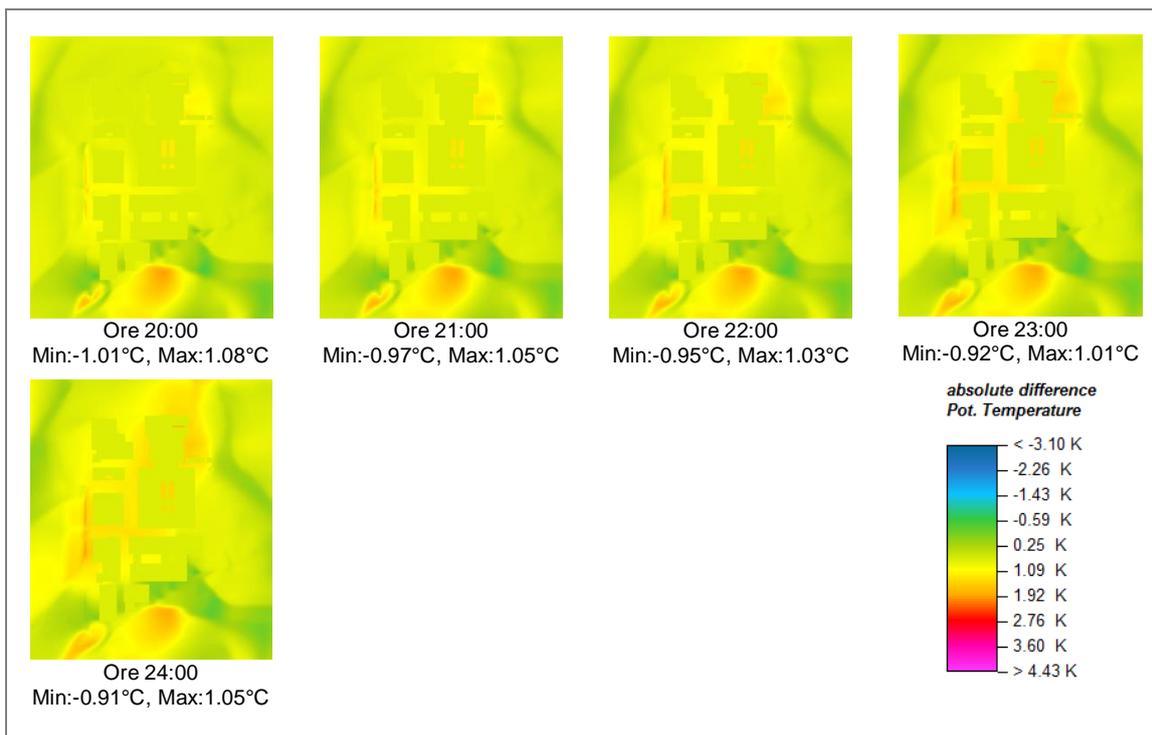


Figura 7.47: rappresentazione planimetrica oraria della differenza di temperatura potenziale tra il quarto ed il quinto scenario relativa alla quota di 1.35 m dal suolo

Le differenze più evidenti sono, però, quelle che si hanno nelle ore più calde del giorno, nello specifico dalle 10:00 alle 16:00, durante le quali si riscontrano temperature maggiori rispetto al sesto scenario in media di 3.54°C.

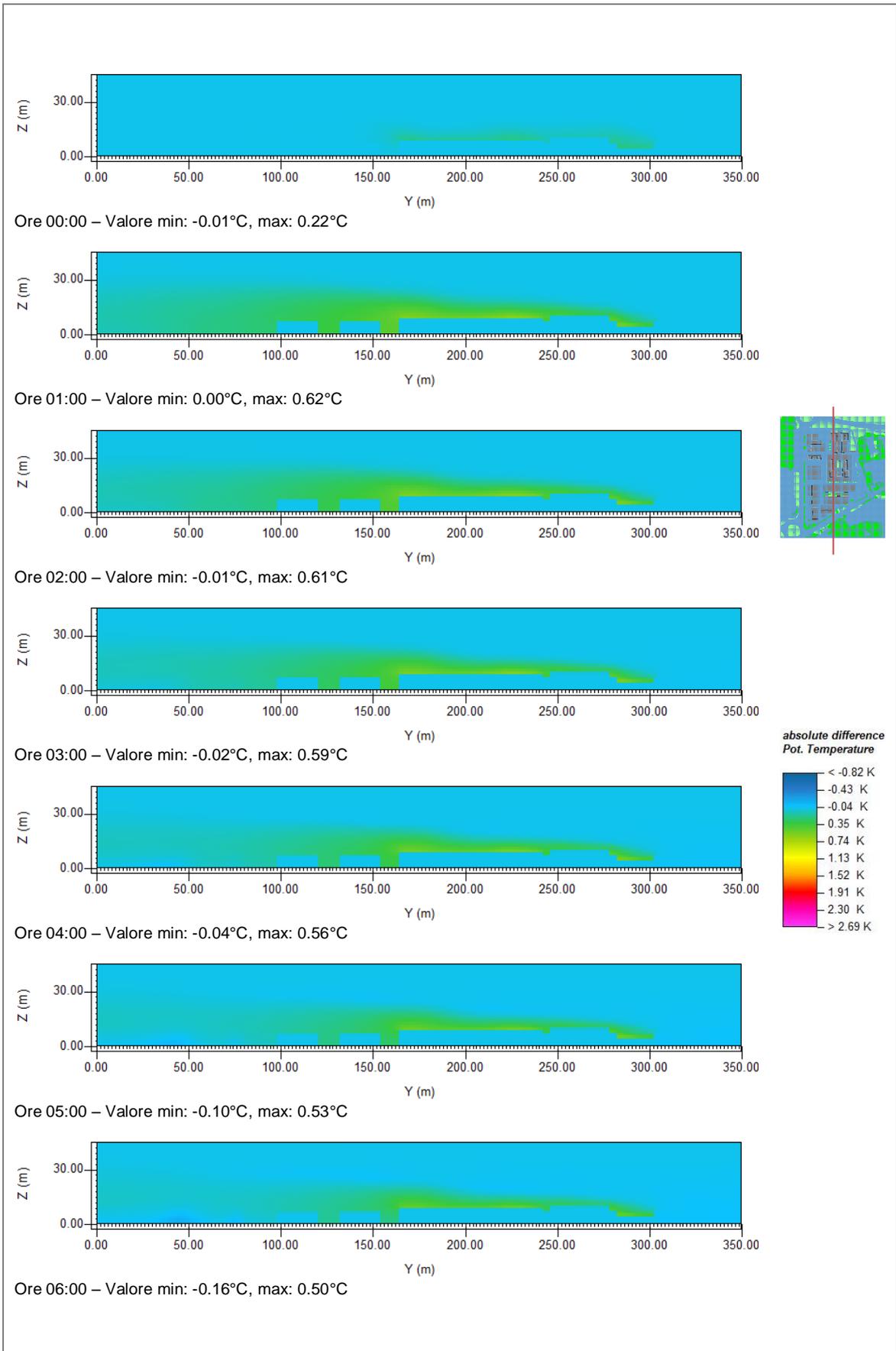
Dalle 17:00 fino al termine della simulazione le differenze sono attenuate, ma comunque pari a circa 1°C per tutte le aree prossime agli edifici.

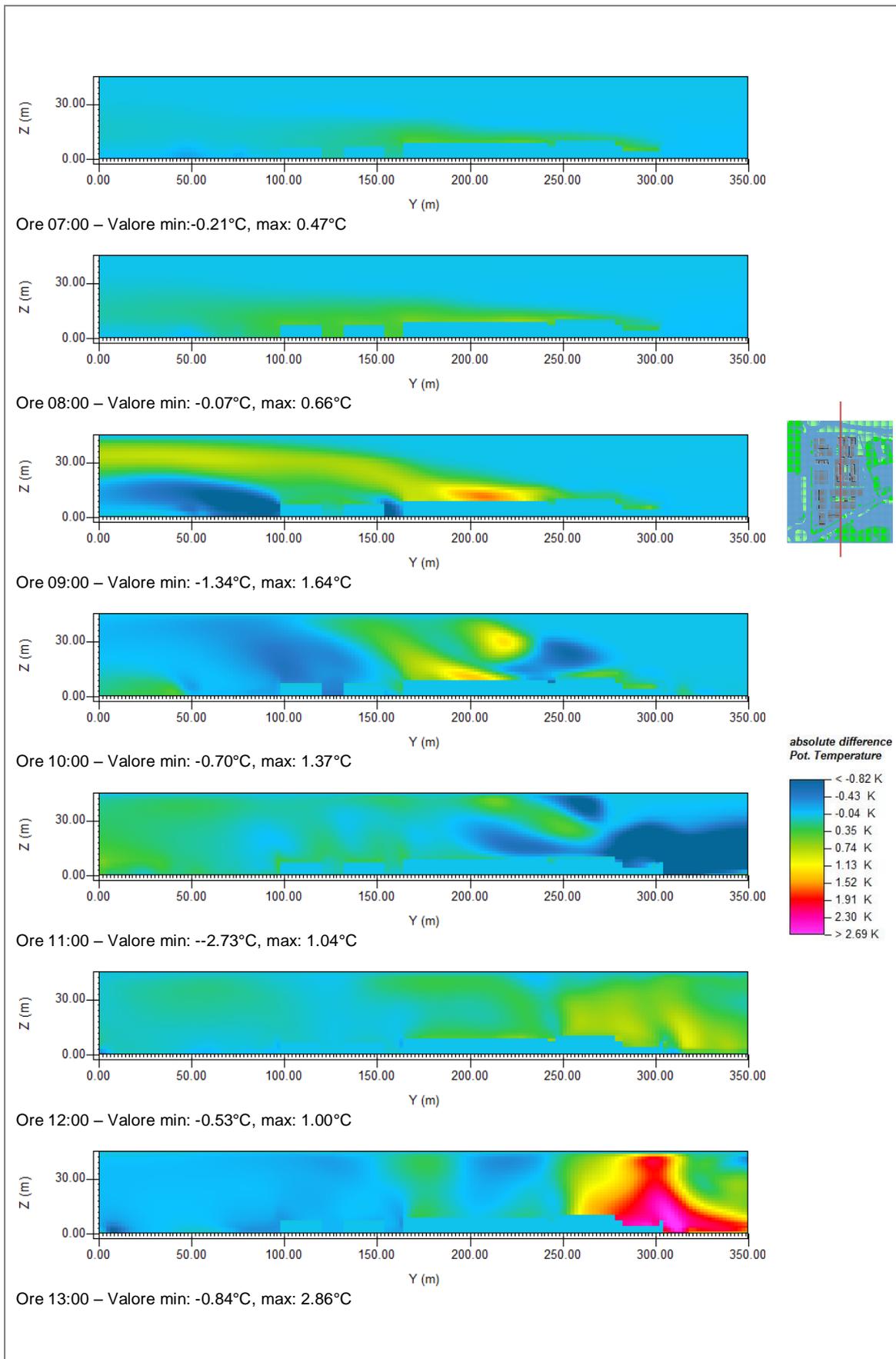
Per valutare i benefici nei confronti dell'isola di calore ci si avvale dei confronti tra le sezioni effettuate in corrispondenza di $X = 160\text{ m}$ rappresentate in Figura 7.48. Anche in questo caso la scala di temperatura riportata in legenda è la stessa di Figura 7.46.

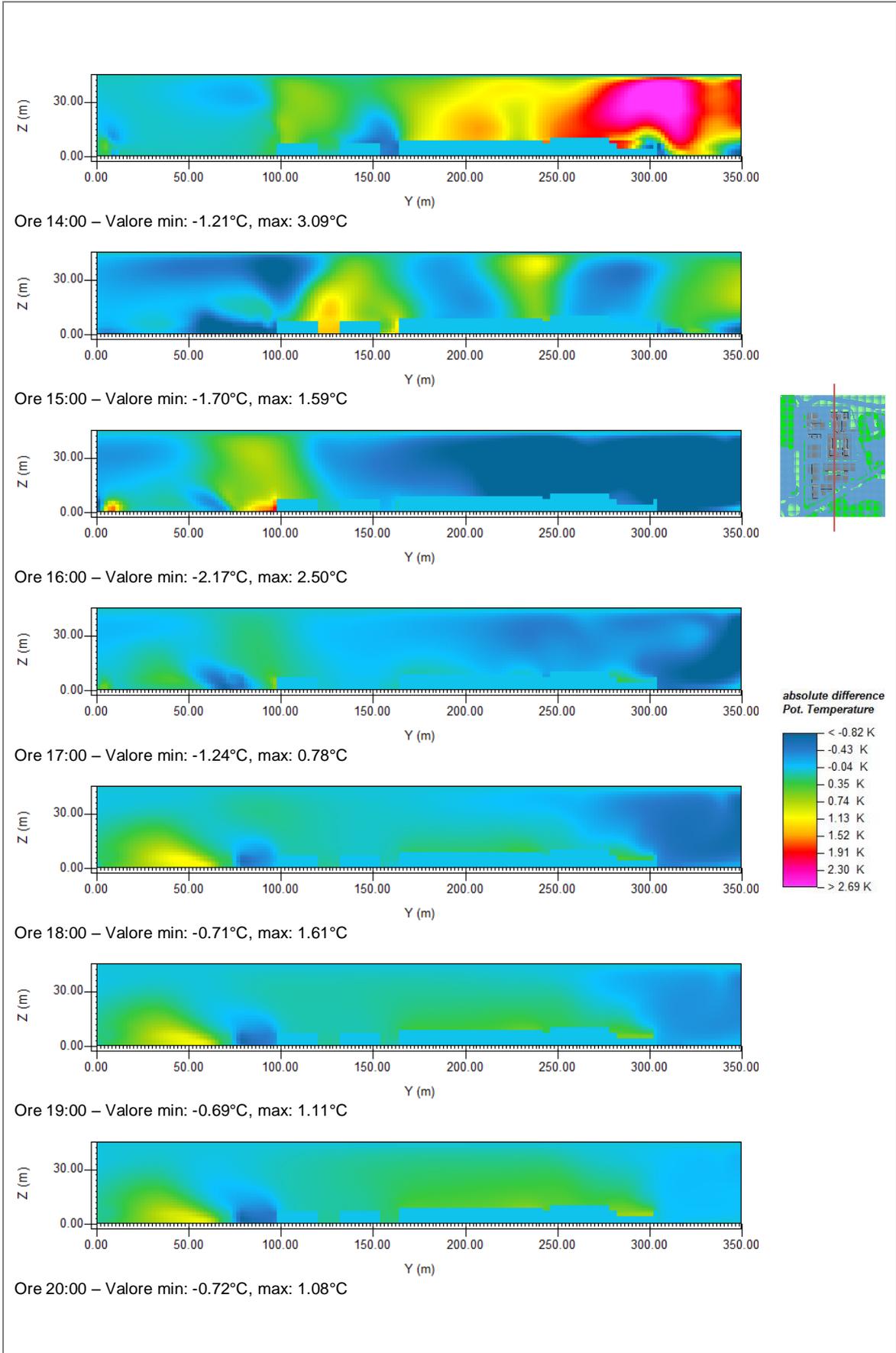
Già nelle prime ore del giorno si nota l'influenza della copertura verde sull'area dell'edificio principale e di quello dei dipartimenti. Infatti dalle 00:00 alle 08:00 è presente un alone giallo-verde in questa zona che mette in luce la differenza tra i due scenari: lo stato attuale genera una temperatura potenziale superiore di circa 0.5°C.

Il massimo beneficio da parte delle coperture autoctone si evidenzia per le 14:00 per cui la differenza massima tra i due scenari raggiunge i 3.09°C.

La sera, dalle 18:00 alla mezzanotte successiva, l'effetto rinfrescante del tetto verde raggiunge valori simili a quelli mattinieri ma si estende fino a quote superiori, superando i 20 m dal profilo delle coperture.







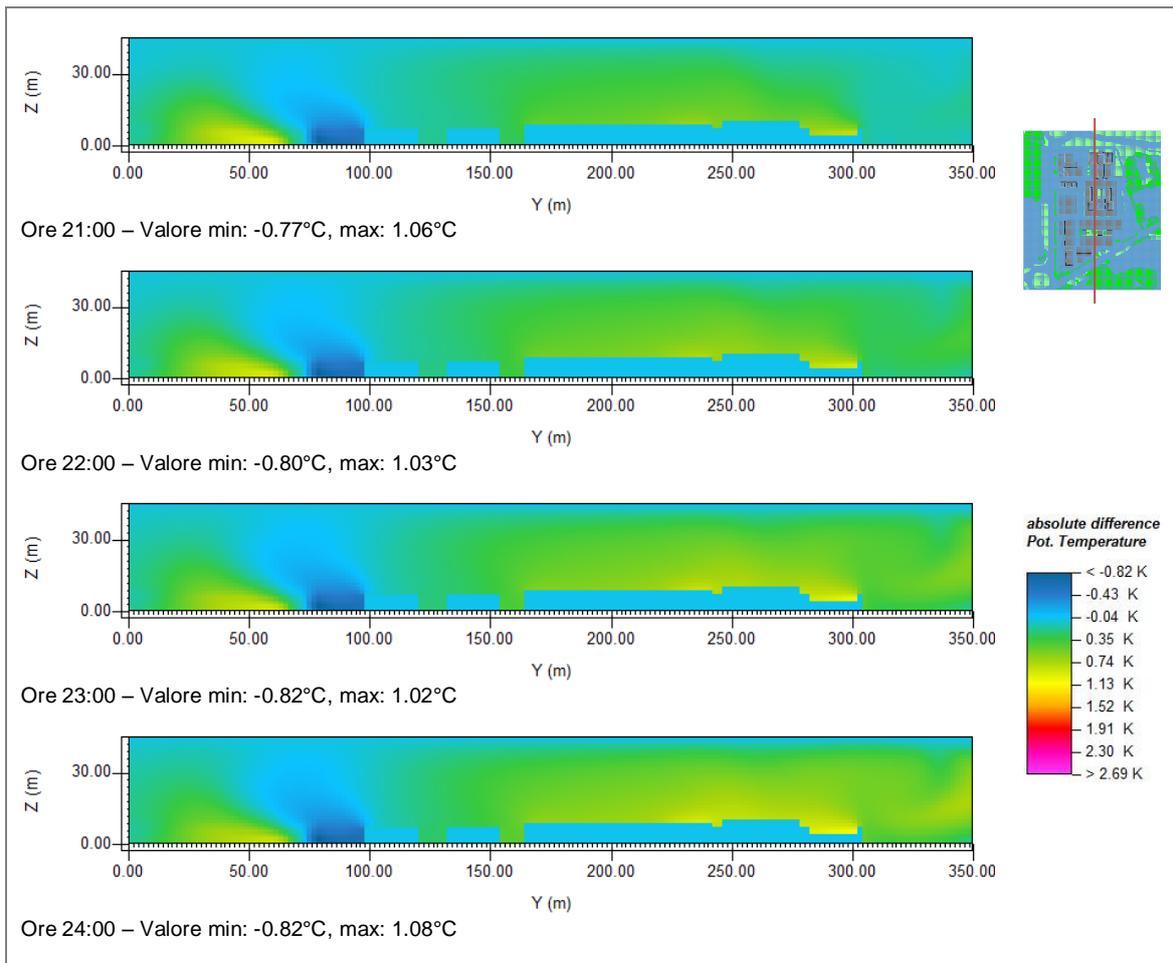


Figura 7.48: rappresentazione oraria della differenza di temperatura potenziale tra il quarto ed il quinto scenario relativa alla sezione per $X\text{ (m)} = 160$. Valori positivi indicano che lo scenario 'stato di fatto' è più caldo rispetto alla soluzione 'tutti tetti verdi autoctoni'.

8. Conclusioni e possibili sviluppi futuri

All'interno di questo elaborato ci si è posti l'obiettivo di valutare i vantaggi, principalmente a livello termico ed idraulico, legati alle coperture verdi direttamente sul campo. Il sito di studio in via Terracini, Bologna, presso la nuova sede della Facoltà di Ingegneria si è rivelato indispensabile a tale scopo.

Grazie alle analisi pluviometriche relative all'intero 2014 è stato possibile approfondire il comportamento idraulico concernente le tre tipologie di coperture presenti sul tetto del LAGIRN.

Nello specifico il tetto verde a Sedum ed il Native si presentano notevolmente più performanti della porzione a guaina bituminosa, sia per quanto riguarda le proprietà laminanti che quelle ritardanti in merito al deflusso.

Tramite la stazione metereologica presente sul tetto si è entrati in possesso dei parametri ambientali relativi al sito sperimentale su scala annuale. Arricchiti questi tramite l'ausilio di altra strumentazione (sonde, termocamera e termocoppie), è stata inoltre portata a termine un'analisi termica comparativa tra le tre tipologie di coperture oggetto di studio.

Durante l'estate i benefici legati alla copertura verde sono particolarmente evidenti. Nello specifico a livello superficiale durante il mese di Giugno si verifica un'escursione termica media giornaliera di 25.4°C per il manto a Sedum, mentre di 35.1°C per la guaina impermeabilizzante.

È stato inoltre possibile quantificare l'effetto di laminazione termica del pacchetto a Sedum durante il mese di Luglio, per cui si registra un'attenuazione media del picco termico riscontrato per il Reference di circa 20°C ed uno sfasamento temporale dello stesso di circa 3 – 4 ore.

Da Ottobre in poi, grazie all'introduzione delle otto termocoppie, si è iniziato a valutare il gradiente termico verticale in corrispondenza del Green, del Native e del Reference Roof. Nonostante non sia stato possibile monitorare contemporaneamente le tre coperture, sono state effettuate dapprima delle comparazioni tra tappeto a Sedum e la guaina bituminosa, poi tra Sedum e Native.

Dal primo raffronto si deduce come a livello superficiale le escursioni termiche cui è sottoposta la guaina siano notevolmente maggiori rispetto a quelle cui è soggetto il

Sedum (43.83°C contro 23.67°C), ma anche che a una distanza di 30 cm dal suolo l'effetto rinfrescante della vegetazione è pari soltanto ad 1°C.

Dal confronto tra Sedum e piante autoctone si nota come il raffrescamento sia condizionato dalle caratteristiche intrinseche delle specie vegetali. Essendo il Sedum una specie a fotosintesi CAM, la cui altezza è decisamente inferiore a quella delle graminacee (5 cm contro 10-15 nel mese in questione), l'effetto rinfrescante ad esso connesso alla quota di 30 cm dal suolo risulta inferiore di circa 3.50°C rispetto al Native, mentre a 60 cm è totalmente indifferente.

Nonostante i totali apparenti benefici della copertura autoctona rispetto le altre due, a differenza del Sedum, il tappeto a graminacee necessita di una maggiore manutenzione, implicando così costi gestionali superiori rispetto alle specie xerofile.

Infine, si è indagato il potere delle coperture a verde di diminuire l'effetto isola di calore atmosferica modellando l'intera area del Lazzaretto tramite il software ENVI-met. Dalla simulazione di tre diversi scenari corrispondenti a:

- 1) Lo stato attuale
- 2) Una situazione ipotetica con tutte coperture a Sedum
- 3) Una situazione ipotetica con tutte coperture con specie autoctone

per la giornata estiva più calda e per un comune giorno di Ottobre, a seguito di una minuziosa calibrazione, è stato possibile dimostrare la validità dei green roofs nella lotta al riscaldamento delle grandi città.

Il beneficio legato all'adozione delle coperture pensile è chiaramente maggiore durante i mesi estivi, smorzando le temperature addirittura di una decina di gradi a livello planimetrico, ma anche apprezzabile durante il periodo autunnale per cui si abbattano i valori di circa 2.55°C.

Per quanto concerne i possibili sviluppi del presente lavoro, ci si augura che un giorno, avendo a disposizione maggiori risorse economiche, si possano acquistare altre termocoppie per poter effettuare contemporaneamente delle analisi su tutte e tre le tipologie di coperture presenti nel sito sperimentale.

Inoltre, disponendo di un termoflussimetro, sarebbe possibile misurare l'effettiva trasmittanza dei pacchetti in regime stazionario.

Infine, i benefici termici registrati potrebbero essere quantificati a livello di consumi energetici, e quindi di vantaggi pecuniari da parte dell'utente finale.

Bibliografia

1. **Baraldi Rita, Rapparini Francesca, Salomoni Maria Teresa.** Cap 3 - La progettazione del verde. [aut. libro] Matteo Fiori. *Coperture a verde - Ricerca, progetto ed esecuzione per l'edificio sostenibile.* Milano : Hoepli editore S.p.A., 2011.
2. STORMWATER INSTITUTE - HISTORY OF GREENROOFS. *LTU - Lawrence Technological University Site.* [Online] [Riportato: 02 10 2013.] http://www.ltu.edu/water/greenroofs_history.asp.
3. What is the history of green roofs? *BCIT - British Columbia Institute of Technology Site.* [Online] [Riportato: 02 10 2013.] <http://commons.bcit.ca/greenroof/faq/what-is-the-history-of-green-roofs/>.
4. **Abram, Paolo.** *Verde pensile in Italia e in Europa.* Milano : Il verde editoriale S.r.l., 2006.
5. *Le prestazioni acustiche del verde pensile: assorbimento sonoro di coperture di diversa configurazione.* **Pittaluga I., Schenone C., Palla A., Lanza L. G.** Arenzano (GE) : s.n., 2009.
6. Verde pensile. *ISPRA - Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale.* [Online] [Riportato: 20 10 2013.] www.isprambiente.gov.it/files/.../mlg-78.3-2012-verde-pensile.pdf.
7. **Abram, Paolo.** *Giardini pensili - coperture a verde e gestione delle acque meteoriche.* s.l. : Gruppo editoriale Esselibri - Simone, 2004.
8. Daku Italia. [Online] [Riportato: 21 10 2013.] <http://www.daku.it/>.
9. Index S.p.A. [Online] [Riportato: 21 10 2013.] http://www.indexspa.it/indexspacom/home_it.asp.
10. Zinco Italia. [Online] [Riportato: 21 10 2013.] <http://www.zinco-italia.it/>.
11. Green roof plants. *Growing Green Guide.* [Online] [Riportato: 28 12 2014.]
12. Green Roof Plants. *Green Garage.* [Online] [Riportato: 28 12 2014.]
13. Green roof benefits. *Livingroofs.org.* [Online] [Riportato: 02 10 2013.] <http://livingroofs.org/2010030777/green-roof-benefits/waterqual.html>.

14. Vantaggi ambientali di un tetto verde. *Sempergreen*. [Online] [Riportato: 03 10 2013.] <http://www.sempergreen.com/it/informazioni-collegate/i-vantaggi-di-un-tetto-verde/vantaggi-ambientali-di-un-tetto-verde>.
15. *Hidrology and water quality of living roofs in Auckland*. **Fassmann-Beck E., Simcock R.** s.l. : Novatech, 2013.
16. **Jun Yang, Qian Yu, Peng Gong**. Quantifying air pollution removal by green roofs in Chicago. *Atmospheric Environment*. 2008, Vol. 42, 31.
17. Brochure. *Optigrun*. [Online] [Riportato: 21 10 2013.] <http://www.optigrun.it/brochure/brochure-optigrun.pdf>.
18. *On the green roof system. Selection, state of the art and energy potential investigation of a sysem installed in an office building in Athens, Greece*. **Spala A., Bagiorgas H.S., Assimakopoulos M.N., Kalavrouziotis J., Matthopoulos D., Mihalakakou G.** s.l. : ELSEVIER, 2007, Vol. Renewable Energy - an international journal.
19. *Greenroofs UK*. [Online] [Riportato: 02 10 2013.] www.greenroofs.co.uk.
20. **G., Minke**. *Inclined green roofs - ecological and economical advantages, passive heating and cooling effect*. Prague : CESB 07, 2007.
21. Solar Garden Roof First, Fully Integrated Solar and Extensive Green Roof. *Green roof technology - Form and Function*. [Online] [Riportato: 17 11 2014.] http://www.greenrooftechology.com/Solar_PV_Greenroofs.
22. **W., Ansel**. Green Roofs on Medical Facilities: . *IGRA*. [Online] 2012. [Riportato: 04 10 2013.] http://www.igra-world.com/links_and_downloads/images_dynamic/IGRA_Green_Roof_News_1_2012.pdf.
23. **Kadas, Gyongyver**. Rare Invertebrates Colonizing Green Roofs in London. *Urban habitats*. [Online] 12 2006. [Riportato: 04 10 2013.] http://www.urbanhabitats.org/v04n01/invertebrates_full.html.
24. Reducing Urban Heat Islands: Compendium of Strategies - Urban Heat Island Basics. *epa.gov*. [Online] [Riportato: 18 11 2014.] <http://www.epa.gov/heatisland/resources/pdf/BasicsCompendium.pdf>.

25. **Federico Margelli, Silvia Rossi, Teodoro Georgiadis.** Cap 5 - Il clima urbano. [aut. libro] Matteo Fiori. *Coperture a verde - Ricerca, progetto ed esecuzione per l'edificio sostenibile.* Milano : Hoepli Editore S.p.A., 2011.
26. **Ahmed, Rizwan.** STATISTICAL ANALYSIS OF URBAN HEAT ISLAND AND MODELING OF HEAT GENERATION WITHIN STREET CANYON . *The HKU Scholars HUB - University of Hong Kong.* [Online] 2009. [Riportato: 20 11 2014.] <http://hub.hku.hk/bitstream/10722/55648/3/FullText.pdf?accept=1>.
27. **Kuttler, Wilhelm.** Climate change on the urban scale - Effects and Countermeasures in Central Europe. [aut. libro] Netra Chhetril. *Human and Social Dimensions of Climate Change.* s.l. : INTECH, Novembre 2012.
28. **Bonafè, Giovanni.** Microclima urbano: impatto dell'urbanizzazione sulle condizioni climatiche locali e fattori di mitigazione . *Arpa Emilia-Romagna.* [Online] 12 2006. [Riportato: 17 11 2014.] http://www.arpa.emr.it/cms3/documenti/_cerca_doc/meteo/ambiente/bonafe_report_meteo_urbana.pdf.
29. **Harman, Ian Nicholas.** The energy balance of urban areas. *Department of Meteorology - University of Reading.* [Online] 10 2003. [Riportato: 19 11 2014.] <http://www.met.rdg.ac.uk/phdtheses/The%20energy%20balance%20of%20urban%20areas.pdf>.
30. *Approaches to study Urban Heat Island - Abilities and limitations.* **Parham A. Mirzaei, Fariborz Haghighat.** 45, s.l. : Elsevier, 2010, Vol. Building and Environment.
31. **R., Oke Tim.** The energetic basis of the urban heat island. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society.* 1982, Vol. 108, 455.
32. **Baklanov A., J. Burzynski, A. Christen, M. Deserti, K. De Ridder, S. Emeis, S. Joffre, A. Karppinen, P. Mestayer, D. Middleton, M. Piringer e M. Tombrou.** The urban surface energy budget and mixing height in European cities: data, models and challenges for urban meteorology and air quality. Final Report of Working Group 2 of COST-715 Action. *DCE - NATIONALT CENTER FOR MILJØ OG ENERGI.* [Online] [Riportato: 20 11 2014.] http://www2.dmu.dk/atmosphericenvironment/cost/docs/wg2_final.pdf.

33. **Janos, Unger.** Connection between urban heat island and sky view factor approximated by a software tool on a 3D urban database. *University of Szegedi Site*. [Online] 2009. [Riportato: 20 11 2014.] <http://www2.sci.u-szeged.hu/eghajlattan/ungercikk/2009-IJEP-36-Unger.pdf>.
34. **R., Oke T.** The energetic basis of the urban heat island. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 1982, Vol. 108, 455.
35. *Green roof mitigation potential for a proxy future climate scenario in Chicago, Illinois.* **Smith, K., Roeber, P.** 50, 2011, Vol. Journal Applied to Meteorology and Climatology.
36. **Cynthia Rosenzweig, William Solecki, Lily Parshall, Stuart Gaffin, Barry Lynn, Richard Goldberg, Jennifer Cox, Sara Hodges.** *MITIGATING NEW YORK CITY'S HEAT ISLAND WITH URBAN FORESTRY, LIVING ROOFS, AND LIGHT SURFACES. NEW YORK CITY REGIONAL HEAT ISLAND INITIATIVE. FINAL REPORT.* Albany, NY : NEW YORK STATE ENERGY RESEARCH AND DEVELOPMENT AUTHORITY - NYSERDA, Ottobre 2006.
37. *Study on mitigation measures for outdoor thermal environment on present urban blocks in Tokyo using coupled simulation.* **Hong Chena, Ryoza Ookab, Hong Huangb, Takashi Tsuchiyab.** 11, s.l. : ELSEVIER, Novembre 2009, Building and Environment, Vol. 44, p. 2290–2299.
38. *A study on the cooling effects of greening in a high-density city: An experience from Hong Kong.* **Edward Ng, Liang Chen, Yingna Wang, Chao Yuan.** s.l. : Elsevier, Gennaio 2012, Building and Environment, Vol. 47, p. 256–271.
39. *Investigation of thermal benefits of rooftop garden in the tropical environment.* **Nyuk Hien Wonga, Yu Chena, Chui Leng Ongb, Angelia Siab.** febbraio 2003, Building and Environment, Vol. 38, p. 261 – 270.
40. Vegetation as a material of roof and city to cool down temperature. *Advanced Materials Research*. Febbraio 2012, Vol. 461, p. 552-556.
41. **PROFILO CLIMATICO LOCALE - Analisi delle vulnerabilità all'impatto dei cambiamenti climatici.** *BlueAp - Bologna Adaptation Plan for a Resilient City.* [Online] [Riportato: 13 01 2015.] http://www.blueap.eu/site/wp-content/uploads/2013/11/BLUEAP_PROFILO_CLIMATICO_LOCALE.pdf.

42. Piano della Sostenibilità Ambientale 2013-2016. *Unibo*. [Online] [Riportato: 28 09 2014.] <http://www.unibo.it/it/ateneo/chi-siamo/piano-della-sostenibilita-ambientale-2013-2016/piano-della-sostenibilita-ambientale-2013-2016>.
43. **Tartari, arch. Cristina**. *Relazione tecnica di non rilevanza ai fini sismici*. Bologna : s.n., 27 marzo 2013.
44. Giardini pensili. *Floricoltura Panetto*. [Online] [Riportato: 29 09 2014.] <http://www.floricolturapanetto.it/pensili.html>.
45. **Group, Harpo**. SUBSTRATO SEIC VERDE PENSILE A NORMA UNI 11235. *Harpo Group*. [Online] [Riportato: 29 09 2014.] <http://www.harpogroup.it/media/pdf/verdepensile/progettazione/seic-vpe-substrato.pdf>.
46. **Ferrari, Monografia progettata e coordinata da C e al., testi di C. A. Accorsi et.** Cap 3.7 - I prati permanenti a bromo. *Flora e vegetazione dell'Emilia-Romagna*. s.l. : Regione Emilia-Romagna, 1980.
47. Hobo stazione metereologica. *Lambda Spa*. [Online] [Riportato: 02 01 2015.] <http://www.lambdaspa.com/assets/pdf/HoboStazioniMetereologiche.pdf>.
48. FT-90/USB. *Econorma*. [Online] [Riportato: 02 01 2015.] <http://www.econorma.com/caratteristichePDF/WEB-FT-90-USB.pdf>.
49. Fluke Ti400 Infrared Camera. *Fluke*. [Online] [Riportato: 10 01 2015.] <http://www.fluke.com/fluke/auen/thermal-imaging/fluke-ti400.htm?PID=77090>.
50. USB TC-08 Thermocouple Data Logger. *Picotech*. [Online] [Riportato: 02 01 2015.] <http://www.picotech.com/thermocouple.html>.
51. Che tempo faceva a Bologna nel Giugno 2014 - Archivio Meteo Bologna. *www.ilmeteo.it*. [Online] [Riportato: 06 01 2015.] <http://www.ilmeteo.it/portale/archivio-meteo/Bologna/2014/Giugno>.
52. Che tempo faceva a Bologna nel Maggio 2014 - Archivio Meteo Bologna. *www.ilmeteo.it*. [Online] [Riportato: 06 01 2014.] <http://www.ilmeteo.it/portale/archivio-meteo/Bologna/2014/Maggio>.

53. Stazione meteorologica di Bologna Borgo Panigale. *Wikipedia*. [Online] [Riportato: 06 01 2015.] http://it.wikipedia.org/wiki/Stazione_meteorologica_di_Bologna_Borgo_Panigale.
54. **Jernej, Vidmar**. Evaluation of simulation tools for assessment of urban form based on physical performance. *Academia.edu*. [Online] [Riportato: 01 12 2014.] https://www.academia.edu/4820747/Evaluation_of_simulation_tools_for_assessment_of_urban_form_based_on_physical_performance.
55. **Team, Michael Bruse &**. ENVI-met 3.1 Manual Contents. *ENVI-met*. [Online] [Riportato: 02 12 2014.] <http://envi-met.net/>.
56. **Huttner, Sebastian**. Further development and application of the 3D microclimate simulation ENVI-met. *Archimed*. [Online] [Riportato: 12 01 2015.] <http://ubm.opus.hbz-nrw.de/volltexte/2012/3112/pdf/doc.pdf>.
57. **F. Orsini, D. Gasperi, L. Marchetti, C. Piovene, S. Draghetti, S. Ramazzotti, G. Bazzocchi, G. Gianquinto**. Exploring the production capacity of rooftop gardens (RTGs) in urban agriculture: the potential impact on food and nutrition security, biodiversity and other ecosystem services in the city of Bologna. *Food Security*. dicembre 2014, Vol. 6, 6.
58. **C. S. de Munck, A. Lemonsu, R. Bouzouidja, V. Masson, R. Claverie**. The GREENROOF module (v7.3) for modelling green roof hydrological and energetic performances within TEB. *Geoscientific Model Development*. 2013, Vol. 6, 1941.
59. *Urban greenery: increasing resilience to climate change through green roofs and urban forestry*. **Saiz Alcazar, Susana**. Barcellona : s.n., 28-30 Ottobre 2014.
60. *The use of Vegetation for Social Housing Renovations: a cases study in the city of Palermo*. **Luisa Pastore, Rossella Corrao, Per Heiselberg**. Vienna : s.n., 2013.
61. Wind Profile Calculator. *The Swiss Wind Power Data Website*. [Online] [Riportato: 04 01 2015.] <http://wind-data.ch/tools/profile.php?lng=en>.
62. Envi-met Learning. *Envi-met Learning*. [Online] [Riportato: 04 01 2015.] <https://www.facebook.com/pages/Envimet-learning/>.
63. Gradiente termico verticale. *Wikipedia*. [Online] [Riportato: 04 01 2015.] http://it.wikipedia.org/wiki/Gradiente_termico_verticale.

64. I cool roof. *Iuav*. [Online] [Riportato: 04 01 2015.] <http://www.iuav.it/SISTEMA-DE/Archivio-d/approfondi/sostenibil/Carattin-lex-cool-roof.pdf>.
65. **Harpo - Divisione SIEC Verde Pensile. Ufficio tecnico, ricerca e sviluppo.** *Test in termoflussimetro per definire la resistenza termica del solo substrato SEIC*. Trieste : s.n., 2014.
66. **Noah Garrison, Cara Horowitz, Chris Ann Lunghino.** *Looking Up: How Green Roofs and Cool Roofs Can Reduce Energy Use, Address Climate Change, and Protect Water Resources in Southern California*. s.l. : NRDC Report, June 2012.
67. http://it.wikipedia.org/wiki/Isola_di_calore. <http://it.wikipedia.org>. [Online] [Riportato: 02 10 2013.]
68. **Ventura F., Gaspari N., Piana S., Rossi Pisa P.** http://www.arpa.emr.it/cms3/documenti/_cerca_doc/meteo/siminaria/VenturaSIM09.pdf . <http://www.arpa.emr.it>. [Online] [Riportato: 02 10 2013.]
69. <http://www.poliflor.net/it/>. <http://www.poliflor.net/it/>. [Online] [Riportato: 17 11 2014.]
70. **R. Baraldi, F. Rapparini, M. T. Salomoni.** Cap 3 - La progettazione del verde. [aut. libro] Matteo Fiori. *Coperture a verde - Ricerca, progetto ed esecuzione per l'edificio sostenibile*. Milano : Hoepli, 2011.