



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA

Sede Amministrativa: Università degli Studi di Padova

Sede Consorzziata: Università IUAV di Venezia

Dipartimento di *Ingegneria Industriale*

SCUOLA DI DOTTORATO DI RICERCA IN: **INGEGNERIA INDUSTRIALE**

INDIRIZZO: **INGEGNERIA DELL'ENERGIA**

CICLO **XXVI**

CARATTERIZZAZIONE DI COMPONENTI SPECIALI DELL'INVOLUCRO EDILIZIO

Direttore della Scuola: Chiar.mo Prof. Paolo Colombo

Coordinatore d'indirizzo: Chiar.ma Prof.ssa Luisa Rossetto

Supervisore: Prof. Fabio Peron

Co - Supervisore: ing. Massimiliano Scarpa

Dottorando: Ugo Mazzali

*a Fra
e al pinguino*

INDICE

SOMMARIO	4
ABSTRACT.....	5
1. CONTESTO DELLA RICERCA.....	6
1.1. INDIVIDUAZIONE DEL PROBLEMA DI INTERESSE.....	6
1.2. INDIVIDUAZIONE DELLO STATO DELL'ARTE	8
1.3. TEMATICHE IN SVILUPPO E ANCORA APERTE	12
2. INTRODUZIONE AI RIVESTIMENTI VEGETALI D'INVOLUCRO.....	13
2.1. GREEN FAÇADES	13
2.2. LIVING WALLS	14
3. ASPETTI FISICI CONNESSI ALLO STUDIO DEI LIVING WALLS	16
3.1. RICHIAMI DI TRASMISSIONE DEL CALORE.....	16
3.2. LA RADIAZIONE SOLARE.....	25
3.3. EVAPOTRASPIRAZIONE	27
3.4. LEAF AREA INDEX.....	36
4. MONITORAGGIO MICROCLIMATICO DI DUE LIVING WALLS.....	37
4.1. LIVING WALL A GIARDINO VERTICALE CON INTERCAPEDINE VENTILATA (LW-GAOp)	37
4.2. LIVING WALL A PRATO VERTICALE CON INTERCAPEDINE CHIUSA (LW-GrCl).....	61
5. MODELLO NUMERICO	72
5.1. MODELLO NUMERICO PARETE NUDA.....	72
5.2. VALIDAZIONE MODELLO NUMERICO PARETE NUDA	75
5.3. MODELLO NUMERICO LIVING WALL	77
5.4. RISULTATI E VALIDAZIONE MODELLO NUMERICO LIVING WALL.....	80
5.5. CONCLUSIONI	85
6. ANALISI DI SENSITIVITA' SUL MODELLO NUMERICO	87
6.1. SCELTA VARIABILI INDIPENDENTI.....	87
6.2. SCELTA DELLE VARIABILI DIPENDENTI.....	88

6.3. ANALISI DI SENSITIVITA'	88
7. TRASMITTANZA TERMICA DEI LIVING WALLS.....	91
7.1. CONFRONTO TRASMITTANZA PARETE STANDARD	91
7.2. STIMA TRASMITTANZA PACCHETTO PARETE - LIVING WALL.....	92
8. CONCLUSIONI.....	98
9. BIBLIOGRAFIA	100
APPENDICE A – CODICE DI CALCOLO	102
APPENDICE B – NOMENCLATURA EQUAZIONI MODELLO NUMERICO.....	110
RINGRAZIAMENTI.....	111
PUBBLICAZIONI SCIENTIFICHE DI RILIEVO.....	112

SOMMARIO

Negli ultimi decenni, gli aspetti energetici ed in particolare i consumi di energia legati all'intera vita utile degli edifici sono divenuti oggetto di studio e confronto sia nelle sedi istituzionali di tutto il mondo sia nei dibattiti di una opinione pubblica fortemente sensibilizzata. In quest'ottica si colloca questo lavoro che indaga il comportamento termofisico dei *Living Walls*, un nuovo tipo di rivestimento vegetale d'involucro direttamente installato sulle facciate degli edifici.

Nel primo capitolo viene proposto l'attuale stato dell'arte che offre il panorama della ricerca internazionale sul tema dei rivestimenti vegetali ed in particolare dei *Living Walls*. Come emerge dalle ricerche effettuate vi sono molti aspetti ancora in fase di studio e conoscenza per i quali sono necessarie valutazioni di tipo teorico e sperimentale.

Nel secondo e terzo capitolo vengono introdotte le due principali tipologie di rivestimento d'involucro e vengono ripresi i concetti generali di trasmissione del calore calandoli nello studio dei *Living Walls*. Vengono inoltre caratterizzati alcuni fenomeni e parametri tipici dei rivestimenti vegetali come l'evapotraspirazione e il Leaf Area Index.

Nel quarto capitolo vengono riportati i risultati di due campagne di monitoraggio effettuate su prototipi di *Living Walls* resi disponibili durante la fase di ricerca. Evidenti sono apparse le interazioni tra il rivestimento e la parete dell'edificio retrostante in termini di temperatura superficiale e flussi di calore.

Nel quinto capitolo viene proposto un modello numerico il cui obiettivo è quello di riprodurre il comportamento energetico dei due tipi di *Living Wall* monitorati. Il modello è stato validato utilizzando i dati delle campagne microclimatiche effettuate sui prototipi. Nel capitolo successivo viene effettuata l'analisi di sensitività del modello considerando le variabili ritenute più significative.

Nell'ultimo capitolo viene proposto il calcolo della trasmittanza termica di una parete dotata di *Living Wall*, attraverso l'utilizzo del modello numerico sviluppato nei capitoli precedenti e i risultati vengono affiancati ai possibili risultati ottenibili con l'utilizzo della normativa attuale.

Infine, in Appendice A, viene riportato il codice di calcolo scritto per il modello numerico sviluppato nel quinto capitolo.

ABSTRACT

In last decades, environmental aspects and in particular energy consumptions related to whole building life cycle have become an important field of research both at institutional level and in the discussions of a public opinion which is increasingly sensible to these aspects. This research study aims to investigate thermophysical behaviour of *Living Walls*, a new kind of vertical green cladding installed on external facades of building envelope.

In the first chapter, the state of the art of the international research panorama on vertical greenery and in particular on *Living Walls* is proposed. What comes out from the research is that many aspects of this particular kind of green cladding are actually object of study and in this context new sperimental and theoretical informations and evaluations are needed.

In the second chapter two of the most important kinds of green claddings are presented and in the third chapter heat transmission theory is analysed and focused on *Living Wall* behaviour. Others specific phenomenon and features typical of green claddings, such as evapotranspiration and Leaf Area Index, have been analysed.

Results of two monitoring campaigns are presented in the fourth chapter. These field measurements have been performed on two prototypes of *Living Walls*, made available during the research period. Interactions between the cladding and the back wall in terms of surface temperatures and heat fluxes are presented.

In the fifth chapter, a numerical model, which aims to reproduce the energetic behaviour of the two monitored green claddings, is developed and validated against field measurements. In the subsequent chapter a sensitivity analysis is performed on the mathematical model considering the most important variables.

In the last chapter the U-Value calculation, for a facade with a *Living Wall* installed on, is proposed. The calculation is performed by means of the numerical model proposed in the fifth chapter and results are compared to those achievable by means of actual regulations.

In Appendix A, the VBA code of the numerical model, developed in the fifth chapter, is entirely reported.

1. CONTESTO DELLA RICERCA

1.1. INDIVIDUAZIONE DEL PROBLEMA DI INTERESSE

La sostenibilità su scala urbana ha tra i suoi obiettivi la ricerca di un ambiente costruito più confortevole e salutare. Uno degli aspetti più interessanti in questo ambito, è quello legato allo sviluppo di tecnologie di facciata e copertura basate sull'utilizzo di vegetazione. Spesso, congestionati ambiti urbani non consentono l'inserimento di nuovi spazi adibiti esclusivamente a verde, questo amplifica problemi come il noto effetto "isola di calore". È dimostrato, infatti, come le condizioni atmosferiche dell'ambito urbanizzato di una città siano per molti aspetti sensibilmente diverse da quelle registrabili in contesti meno antropizzati di solito identificabili con la periferia e la campagna. Le superfici degli edifici possono raggiungere temperature che superano quelle dell'aria anche con valori che vanno dai 10 °C ai 40 °C (**Taha et al. 1992**). Questo fenomeno può essere in definitiva associato a diversi fattori tra i quali: assorbimento della radiazione solare e aumento del calore immagazzinato dalle strutture dell'edificio; blocco del re-irraggiamento notturno verso la volta celeste a temperature inferiori; basso indice di evapotraspirazione dovuto alla scarsa presenza di vegetazione (**Oke 1982**). Alcuni autori arrivano a quantificare l'aumento delle temperature dell'ambito urbano fino a valori di 10°C rispetto al contesto rurale e molte strategie cominciano ad essere proposte per mitigare tale effetto. (**Rosenfeld et al. 1995, Tatano et al. 2013**)

In quest'ottica si colloca lo studio di nuovi sistemi per sfruttare le pareti ed i tetti degli edifici esistenti con l'obiettivo di contenere i consumi energetici, ridurre le temperature superficiali e contribuire a migliorare la qualità dell'aria. In generale tali sistemi spaziano dalle tecnologie a facciata ventilata e doppia pelle per arrivare ai tetti verdi e ai *Green Walls*. Tale termine, nell'ambito ingegneristico legato alla fisica dell'edificio, si riferisce a muri coperti da vegetazione. Con il termine *Vertical Greenery*, invece, ci si riferisce a muri coperti da vegetazione nell'ambito delle loro funzioni ecologiche all'interno di un ecosistema (**Jim and He 2011**). Nella categoria *Green Walls* solitamente si includono sia le cosiddette *Green Facades*, ossia sistemi rampicanti naturali anche supportati da strutture di sostegno, sia i *Living Walls*, sistemi in cui la vegetazione è seminata su supporti modulari che possono contenere terra o particolari feltri imbevuti.

Per quel che concerne il mondo delle tecnologie di facciata legate all'utilizzo di vegetazione, molti studi sono già stati prodotti sugli effetti energetici legati alla presenza di tetti vegetali, ma è, al contrario, abbastanza carente la letteratura che si è occupata di studiare gli effetti energetici prodotti dalla presenza di *Green Walls*. In particolare, la famiglia dei *Living Walls* è generalmente costruita con il medesimo criterio di una facciata ventilata, ma sostituisce al rivestimento superficiale esterno, un pacchetto vegetale, con o senza terriccio, e coltivato con piante o erba di varia specie.

In generale, essendo la disponibilità di superficie verticale degli edifici di notevole entità, lo studio di nuovi sistemi che permettano di raggiungere prestazioni energetiche migliori attraverso le installazioni di pareti verdi o facciate ventilate/doppia pelle, consentirebbe di sfruttare l'enorme potenziale legato a tale disponibilità, mantenendo intatta e addirittura migliorando la qualità urbana e ottenendo una riduzione dei

consumi energetici, prevalentemente per la climatizzazione estiva, la cui finalità sociale è di indiscutibile importanza.

Risulta dunque chiaro che il deficit di conoscenza della comunità scientifica, del mondo dell'architettura e delle costruzioni in generale, rispetto a tali sistemi di facciata riguarda prevalentemente le loro prestazioni fisiche, energetiche e la loro interazione con l'edificio. Di tali aspetti si occuperà questo lavoro cercando di contribuire a colmare le lacune ad oggi ancora presenti.

1.2. INDIVIDUAZIONE DELLO STATO DELL'ARTE

E' stato effettuato un dettagliato studio sullo stato dell'arte ricavato dalla letteratura scientifica in merito all'interazione energetica dei *Living Walls* sugli edifici. Di seguito vengono riportati alcuni lavori scientifici particolarmente interessanti relativi a campagne di monitoraggio e metodi di simulazione numerica sviluppati per meglio comprendere il comportamento termofisico dei sistemi verdi di facciata. Alcuni autori (**Wong et al. 2009**) hanno simulato gli effetti di sistemi verdi di facciata sulla temperatura superficiale dell'involucro e sui consumi di energia degli edifici, utilizzando come variabile di riferimento la temperatura media radiante interna e l'energia utilizzata per il raffrescamento. Le simulazioni sono state effettuate attraverso l'utilizzo del software Tas. Sono stati ipotizzati tre scenari: il primo ipotizzava un edificio standard con muratura completamente opaca, in un primo caso ricoperto totalmente da vegetazione (scenario 1A) e in un secondo caso senza alcun tipo di protezione vegetale (scenario 1B); il secondo scenario era simile al primo, ma con la presenza di 7 finestre su ciascuna facciata, ed è stato simulato anch'esso in due configurazioni, una con copertura vegetale (scenario 2A) una senza copertura vegetale sulle parti opache (scenario 2B); il terzo scenario ipotizzava un edificio completamente vetrato senza copertura vegetale (scenario 3A), e con una copertura vegetale prima del 50% (scenario 3B) e successivamente del 100% (scenario 3C).

Tabella 1 – Scenari ipotizzati nel lavoro di (**Wong et al. 2009**)

Scenario	TEMPERATURA MEDIA RADIANTE [°C]		Riduzione di energia [%]
	Minima	Massima	
1A	30,28	34,39	
1B	23,20	24,01	74,29
2A	27,71	36,57	
2B	27,82	35,30	10,35
3A	27,63	49,94	
3B	27,73	45,81	12,45
3C	27,48	45,03	17,93

La riduzione delle temperature medie radianti per i vari scenari ipotizzati passa da un minimo di circa 1°C ad un massimo di 17°C di riduzione, rispetto al caso standard, come mostrato in **Tabella 1**. Interessanti considerazioni sull'effetto schermante e sull'indice di area fogliare Leaf Area Index (LAI, cfr. paragrafo 3.4) sono state fatte. E' emersa una riduzione dei consumi per raffrescamento in un ulteriore scenario, chiamato 3Cii, fino a valori di circa il 32% è raggiungibile con coperture vegetali ad alto LAI e a basso coefficiente di schermatura. I due indici sono stati, infine, collegati con una relazione di tipo lineare. Un indice ETTV (Energy Thermal Transfer Value) è stato calcolato per ogni tipo di scenario. L'indice ETTV è basato sul concetto di coefficiente di scambio termico globale e misura il carico termico in un edificio attraverso il suo involucro considerando l'ingresso di energia per conduzione attraverso le pareti e i vetri, e il coefficiente di shading per le finestre. Il valore di ETTV più basso pari a 35,32 W/m² è stato simulato con un coefficiente di shading per la parete vegetale di 0,041 ed con una efficienza del sistema verde pari a circa il 40%.

Il lavoro di Cheng (**Cheng et al. 2010**) ha valutato l'effetto di sistemi di verde verticale sull'ambiente interno attraverso due esperimenti. Il primo esperimento si è occupato di capire gli effetti dell'irrigazione sulla distribuzione di umidità nel substrato di terreno che accoglieva le piante; il secondo ha utilizzato un sistema di

rivestimento verde verticale per studiare il potenziale di mitigazione dei carichi solari. Il test prevedeva l'installazione di 5 pannelli su ogni lato di un muro in calcestruzzo spesso 30 cm. Il monitoraggio è stato effettuato sia su di un muro ricoperto di vegetazione sia su di uno vicino lasciato appositamente scoperto. È emerso che le temperature medie dei moduli vegetali, misurate in corrispondenza del substrato, erano più basse delle temperature esterne anche di 14°C. Inoltre, considerazione importante, è emerso che più calde erano le giornate, migliore è risultato l'effetto di raffrescamento dato dai moduli vegetali che consentivano anche uno sfasamento di circa 14 ore. Per il muro nudo le temperature misurate sono arrivate anche a valori di 45 °C contro i 29 °C misurati sulla parete vegetale.

Riduzioni di temperature superficiali fino a 20°C e dei flussi di calore fino al 70% rispetto ad un caso base senza parete vegetale, sono riportate anche da Mazzali (**Mazzali et al. 2013**). Un ulteriore lavoro proposto da Wong (**Wong et al. 2010**) riguarda lo studio di 8 differenti sistemi di inverdimento verticale ed aveva l'obiettivo di valutare l'impatto di tali sistemi sulle performance energetiche degli edifici e sulle temperature nell'immediato intorno dei rivestimenti vegetali. Lo studio è stato condotto utilizzando come parametri di riferimento le temperature superficiali e quelle dell'aria ambiente. Le dimensioni dei muri in calcestruzzo retrostanti la struttura vegetale e di quello di controllo erano simili e misuravano 4 m in larghezza e 8 m in altezza. Lo spessore del muro era di 30 cm. La limitazione dell'esperimento risultava nel fatto che i muri erano esposti alla radiazione solare da entrambi i lati e non rappresentavano quindi una situazione reale di muro delimitante un ambiente chiuso e condizionato. Le temperature dell'ambiente esterno sono state monitorate ad una distanza di 15 cm, 30 cm, 60 cm e 100 cm. I risultati hanno messo in luce un evidente riduzione delle temperature superficiali delle pareti ricoperte da vegetazione, rispetto a una parete di controllo non coperta, con valori fino a 10°C. È inoltre emerso che il profilo di temperatura dell'ambiente esterno è modificato dalla presenza del sistema di vegetazione verticale fino ad una distanza di circa 15 cm e non oltre.

Un ulteriore campo di indagine ha coinvolto altri autori (**Jim and He 2011**) che hanno analizzato il flusso di calore attraverso un sistema *Green Wall*. Il gruppo di ricerca si è occupato di creare un modello termodinamico che riproducesse i flussi energetici nel sistema verde e che potesse essere validato attraverso misurazioni condotte sul campo con un prototipo creato ad hoc. Un interessante modello matematico della radiazione solare incidente sulla parete verde è stato sviluppato in funzione degli angoli di incidenza e del coefficiente di torbidità. Il modello è stato poi validato attraverso l'utilizzo degli indici RMSE e NSEC, risultando efficiente per gli scopi previsti. I risultati hanno dimostrato che i flussi di calore stagionali sulla parete verde variano con la variazione delle principali forzanti climatiche, in particolare della radiazione. L'effetto schermante del green wall assorbe l'energia solare impedendo che questa raggiunga la superficie del muro. Il muro a Sud, utilizzato negli esperimenti sul campo, mostra una riduzione dei flussi di calore entranti se confrontato con il muro posizionato a Nord.

Altri autori (**Sheweka and Magdy 2011**) si sono occupati di studiare gli effetti sulla salute nell'ambiente abitato, gli aspetti economici e sociali conseguenti all'installazione di *Living Walls*. Viene fornita una classificazione dei sistemi di inverdimento e sottolineato come le piante possano offrire benefici nell'ambito urbano attraverso due meccanismi: schermatura diretta ed evapotraspirazione. Tali meccanismi portano, come

già sottolineato da altri autori, alla riduzione delle temperature dell'aria e al miglioramento della qualità dell'aria attraverso la filtrazione delle particelle trasportate dall'aria. Da un punto di vista economico possono contribuire a ridurre i costi per le infrastrutture di smaltimento delle acque meteoriche grazie al contenimento dei flussi d'acqua piovana evitando così il sovraccarico delle strutture di drenaggio e possono aumentare la vita dell'involucro dell'edificio grazie alla riduzione dello stress climatico sulle facciate stesse. Infine, da un punto di vista sociale, possono aumentare la vivibilità degli spazi e favorire luoghi di incontro per il gioco, lo sport e la ricreazione.

Altre interessanti considerazioni sono proposte da Perini, Ottelè e Rosasco (**Perini et al. 2011, Perini and Rosasco 2013**), i quali inizialmente si sono occupati di valutare l'influenza dei rivestimenti vegetali sulla velocità del vento nei pressi della facciata e in un secondo lavoro hanno ipotizzato una analisi costi benefici dei sistemi di rivestimento vegetale. Nel primo lavoro sono state monitorate le temperature dell'aria e delle superfici su alcune installazioni di sistemi di inverdimento verticale sia diretti (sistemi che utilizzano le proprie caratteristiche rampicanti per attaccarsi direttamente sulla facciata dell'edificio) che indiretti (sistemi la cui installazione richiede l'utilizzo di ancoraggi e supporti artificiali). Inoltre è stata monitorata la velocità del vento in alcuni punti nei pressi dell'installazione per poter studiare il profilo della velocità. È stato dimostrato che per i sistemi indiretti la velocità dell'aria presenta una forte riduzione all'interno del fogliame, ma che i valori di velocità all'interno dell'intercapedine d'aria si ripristinano simili a quelli misurati all'esterno, a circa 1 m dal *Living Wall*. In queste condizioni la componente della resistenza termica superficiale esterna legata alla velocità dell'aria non presenta differenze tra il caso con e senza parete vegetale. Diverse sono le conclusioni nel caso di sistemi diretti in cui la presenza di vegetazione direttamente a contatto con la parete, senza la formazione di intercapedine, riduce la velocità del vento a valori vicini a 0 m/s, questo consente di ipotizzare che per la resistenza termica superficiale esterna si possa considerare una componente legata alla velocità dell'aria molto simile alla componente interna con dirette influenze sulla resistenza totale della parete.

Nel secondo lavoro gli autori presentano una analisi costi benefici per sei diversi sistemi vegetali. Come studiato, i costi possono andare da poche decine di euro a metro quadrato fino a molte centinaia di euro per metro quadrato a seconda del tipo di rivestimento e dei materiali utilizzati. Gli indicatori utilizzati per stimare la sostenibilità dell'intervento sono di tre tipi: Net Present Value (NPV), Internal Rate of Return (IRR) e PayBack Period (PBP). Vengono poi considerati costi e benefici di tipo sociale (tra cui miglioramento della qualità dell'aria, impatti estetico e psicologico) e personale (riduzione dei consumi di raffrescamento e incentivi) e secondo tre scenari (migliore, medio, peggiore). Le conclusioni sono molto chiare: i sistemi diretti sono gli unici il cui NPV è positivo e il tempo di ritorno può variare da un minimo di 16 anni ad un massimo di 24 anni; praticamente tutti gli altri sistemi presentano un NPV negativo e in particolare i *Living Walls* presentano una insostenibilità economica che li porta ad avere un tempo di ritorno PBP maggiore di 50 anni dovuto ad alti costi di installazione e manutenzione.

Sul tema della valutazione ambientale globale anche altri autori hanno dato un importante e completo contributo (**Pulselli et al. in proof**). Questo lavoro utilizza un altro indicatore ambientale chiamato Emergenza

da cui prende il nome la valutazione associata: Emergy based Evaluation. Rispetto ad altri indicatori ambientali comunemente utilizzati, l'Emergia pone molta attenzione ad informazioni complementari (costi e benefici ambientali) per valutare la sostenibilità o meno degli interventi analizzati. L'analisi è stata condotta per *Living Walls* ad intercapedine aperta e chiusa coltivati ad erba e giardino rispettivamente. I risultati mostrano come entrambi i tipi di rivestimento, in certe condizioni climatiche e costruttive (muro massivo orientato a Sud in clima mediterraneo), possano raggiungere una condizione energetica neutrale in 25 anni come calcolato utilizzando l'indicatore CBR che esprime il rapporto tra i costi (energia e materiali) ed i benefici ambientali (risparmio energetico).

Concludendo, in generale tutte le informazioni raccolte in letteratura mostrano come gli effetti della presenza di rivestimenti vegetali siano prevalentemente collegati alla riduzione delle temperature superficiali dovuta all'evidente effetto schermante e ad una potenziale riduzione dei consumi di raffrescamento. Si possono raggiungere riduzioni nell'ordine dei 20°C e qualche autore ha legato la presenza dei *Living Walls* anche a riduzioni nei consumi di raffrescamento fino al 70%. Tuttavia, se per la riduzione delle temperature superficiali è stato possibile effettuare un monitoraggio direttamente sul campo, come proposto nei vari articoli citati, più complesso è stimare il beneficio sui consumi di raffrescamento e per tali valutazioni è necessario affidarsi alla modellazione numerica e alle simulazioni dinamiche.

1.3. TEMATICHE IN SVILUPPO E ANCORA APERTE

Come accennato nel paragrafo precedente, vi sono alcune tematiche relative alla presenza di rivestimenti architettonici vegetali che non sono ancora state approfondite in maniera esaustiva.

Un primo argomento di indagine ancora aperto è la comprensione dettagliata dell'interazione energetica tra il *Living Wall* e la struttura retrostante e di conseguenza l'influenza che tale tipo di installazione può avere sui consumi di raffrescamento e riscaldamento dell'ambiente adiacente. Di questo tema si è occupato Kontoleon (**Kontoleon and Eumorfopoulou 2010**) che ha sviluppato un modello numerico dimostrando come sia possibile una riduzione delle temperature superficiali da un minimo di 1°C-2°C sulla superficie Nord fino ad un massimo di 16°C – 17°C sulla superficie Ovest, ma soprattutto stimando una riduzione dei consumi energetici di raffrescamento, rispetto ad un caso standard. In particolare gli autori, tra le altre cose, hanno correlato il fabbisogno di energia per il condizionamento di una zona termica, con la percentuale di copertura fogliare (LAI), l'orientamento della parete vegetale e tre configurazioni del muro di supporto (isolante interno, isolante in intercapedine, isolante esterno). I consumi più alti sono registrati quando il *Living Wall* è installato su un muro con isolamento posizionato sul lato esterno, mentre il posizionamento dell'isolante nelle altre due configurazioni porta ad una evidente riduzione dei consumi. Il legame con l'orientamento è molto evidente e mostra come l'installazione del rivestimento a Nord è praticamente ininfluenza e porta ad una riduzione dei consumi non superiore al 4.6%; rispetto agli altri orientamenti il risultato è pari al 18.2 % per l'installazione ad Est, pari al 7.6 % per l'installazione a Sud e molto elevato e pari a circa il 20 % per l'installazione ad Ovest.

Nel già citato lavoro di (**Wong et al. 2009**) è stata associata una riduzione dei consumi di energia per raffrescamento ad ogni scenario proposto. Nel primo scenario 1B è stata calcolata una possibile riduzione di energia pari al 74 %, ma questo è dovuto alla forte riduzione delle temperature radianti dovuta al completo rivestimento effettuato con la protezione vegetale. Per lo scenario 2B, poiché la radiazione solare è libera di entrare attraverso le finestre, che non sono schermate dalla protezione vegetale, il valore di riduzione dei consumi di energia per raffrescamento scende a circa il 10 %. Infine, una riduzione di circa il 18 % sui consumi di raffrescamento è stata raggiunta dalle simulazioni dello scenario 3C dove una copertura vegetale è stata applicata ad un edificio con finestre, anche questa volta in maniera integrale.

Un secondo argomento peculiare di indagine riguarda l'incidenza dell'evapotraspirazione e come questa intervenga nel bilancio energetico della struttura. Su questo tema alcuni autori (**Stec et al. 2005**) e (**Allen et al. 1998**) hanno stimato, grazie a metodi in grado di quantificare la quantità d'acqua evapotraspirata, la quantità di energia rimossa dallo strato di piante per effetto della vaporizzazione dell'acqua.

Un terzo argomento ancora in sviluppo si concentra sul ruolo dell'intercapedine dietro la struttura di rivestimento e della sua influenza rispetto al resto del sistema. Attualmente possiamo considerare due tipi di intercapedine: una aperta ed una chiusa. La presenza di una tipologia rispetto ad un'altra incide sulle portate d'aria all'interno dell'intercapedine e di conseguenza influenza in maniera notevole gli scambi convettivi tra l'aria all'interno dell'intercapedine e la superficie esterna della parete di supporto.

2. INTRODUZIONE AI RIVESTIMENTI VEGETALI D'INVOLUCRO

In questo capitolo verranno introdotte le due principali famiglie di rivestimenti vegetali che vengono più diffusamente installate sugli involucri degli edifici. La distinzione classica (**Pérez et al. 2011**) dei sistemi di verde verticale propone due macro famiglie: *Green Façades* e *Living Walls*. Per la prima tipologia, le *Green Façades*, non si parla di una vera e propria installazione essendo in realtà caratterizzata da rampicanti naturali che, solo in alcuni casi, sfruttano una struttura molto leggera ancorata all'involucro che consente loro di poter crescere in verticale. Solitamente in questa tipologia di verde verticale non viene utilizzata una particolare tecnica per l'irrigazione. Nel secondo caso, i *Living Walls*, possiamo parlare di vere e proprie installazioni che si collocano concretamente sulle facciate degli edifici modificandone in modo definitivo l'aspetto formale ed energetico e interagendo anche sul contesto ambientale circostante. Questa tipologia appartiene ai sistemi idroponici che consentono la crescita di piante senza l'utilizzo di terra, ma esclusivamente con altri supporti come feltro argilla o zeolite continuamente irrigati con acqua e particolari sostanze nutritive tra cui prevalentemente sali minerali.

Gli effetti dell'utilizzo di schermature verdi sono in parte noti e possono essere riassunti in 5 azioni fondamentali: riduzione delle temperature superficiali, riduzione dell'effetto isola di calore, produzione di O₂ per effetto fotosintetico, azione ombreggiante, aumento benessere psicofisico.

Come descritto al paragrafo 1.3 obiettivo di questo lavoro sarà approfondire alcune di queste tematiche che risultano ancora in fase di studio.

2.1. GREEN FAÇADES

L'utilizzo di vegetazione, sia essa rampicante o decumbente, per coprire e proteggere le pareti degli edifici ha origini molto lontane. Le prime pergole, di cui si ha notizia nel mondo occidentale, utilizzate con scopi utilitaristici legati agli otia degli intellettuali risalgono ai primi secoli dell'Impero Romano. Nel corso del tempo, poi, vennero scritti i primi testi (**Di Crescenti 1299-1305**) legati all'utilizzo di pergole e verde come protezione solare per arrivare poi al mondo contemporaneo che, vincolato da necessità di tipo energetico, è stato costretto a riscoprire l'utilità del verde anche legandolo al risparmio dell'energia per il condizionamento degli edifici.

I sistemi tradizionali, essendo quelli con una storia più lunga, hanno nell'azione ombreggiante di protezione dai raggi solari nel periodo estivo, uno degli obiettivi principali. Se lasciati crescere su pergole, inoltre, gli stessi rampicanti, spesso scelti tra le specie caduciformi, permettono la penetrazione dei raggi solari nel periodo invernale.

Un interessante lavoro di catalogazione ed analisi dei rivestimenti vegetali è stato svolto da Raimondo (**Raimondo 2008**), che, tra le altre cose, ripropone la suddivisione dei vari tipi di aggrappaggio delle piante e i vari tipi di strutture di sostegno attualmente utilizzate per i rampicanti naturali.

In Figura 1 vengono mostrati due esempi di rivestimento vegetale appartenenti alla famiglia delle *Green Façades*. In entrambi i casi mostrati in figura si tratta di rampicanti senza alcun tipo di struttura di sostegno e

che hanno sfruttato, per risalire la facciata dell'edificio, solo il loro apparato radicale. Nel primo caso (a) si tratta di *Parthenocissus Tricuspidata*, comunemente detta *Vite Americana*, presente sulla facciata Ovest del Palazzo del Territorio presso il Comune di Vicenza nel cortile del Teatro Olimpico palladiano. Nel secondo caso di Figura 1 (b) è presente un'ulteriore specie oltre alla *Parthenocissus Tricuspidata* chiamata *Jasminum*, comunemente detta *Gelsomino* e presente sulla facciata Sud della villa Carnevale-Montuori presso il Lido di Venezia.



a)



b)

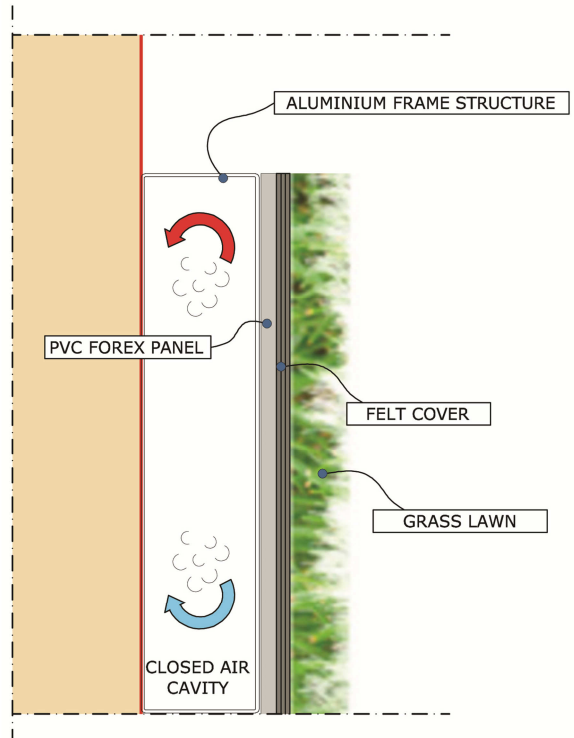
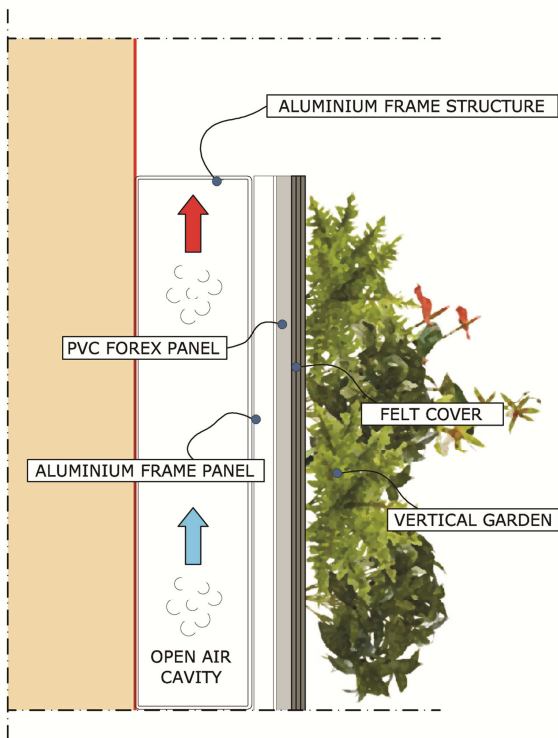
Figura 1 – Esempi di rivestimento vegetale rampicante. a) *parthenocissus tricuspidata*; b) *parthenocissus tricuspidata* e *jasminum* (per gentile concessione di Carnevale-Montuori)

2.2. LIVING WALLS

La seconda tipologia di rivestimenti vegetali è, come detto, quella dei *Living Walls*. Esso costituisce oggetto di analisi dettagliata del presente lavoro. Durante il periodo di ricerca sono state studiate due tipologie di *Living Wall*:

- *Living Wall* coltivato a giardino verticale con intercapedine ventilata aperta, abbreviato in questo lavoro con il nome di LW-GaOp (Living Wall with Garden and Open cavity).
- *Living Wall* coltivato a prato verticale con intercapedine chiusa, abbreviato in questo lavoro con il nome di LW-GrCl (Living Wall with Grass and Closed cavity).

In Figura 2 sono mostrate entrambe le tipologie. Come è possibile notare il *Living Wall* si distingue dalla *Green Façade* per la chiara presenza di un supporto artificiale completamente opaco su cui viene seminata la vegetazione, sia essa giardino o erba. Solitamente la struttura in alluminio viene tassellata alla parete dell'edificio e su di essa viene fissato un pannello di supporto. Il materiale più utilizzato è PVC di tipo Forex. Oltre il pannello vi è solitamente la presenza di feltri su cui viene seminata la vegetazione. Nel caso, ad esempio del *Living Wall* mostrato in Figura 2a, i feltri sono tre e con diverse funzioni come dettagliatamente analizzato nel capitolo 4, su tali supporti vengono seminate in apposite tasche diversi tipi di piante. Nel caso mostrato in Figura 1 invece, il feltro di supporto è uno solo e ospita direttamente lo strato erboso.



a) b)
 Figura 2 – Schema di due tipi di Living Wall. a) LW-GaOp; b) LW-GrCl

3. ASPETTI FISICI CONNESSI ALLO STUDIO DEI LIVING WALLS

In questo capitolo verranno discussi gli aspetti fisici ritenuti più significativi nella trattazione, nello studio e nella modellazione numerica del comportamento energetico dei rivestimenti vegetali di involucro, nella fattispecie dei due *Living Walls* introdotti al capitolo 2. In particolare, si è ritenuto opportuno riproporre gli elementi di base della teoria del trasferimento di calore applicata allo studio dei rivestimenti vegetali, riprendere alcuni argomenti sullo studio della geometria e della radiazione solare, affrontare il tema dell'evapotraspirazione, dello studio delle intercapedini d'aria e dei parametri ottici coinvolti nella caratterizzazione e successiva modellazione dei *Living Walls*.

3.1. RICHIAMI DI TRASMISSIONE DEL CALORE

3.1.1. INTRODUZIONE

E' possibile trasferire energia dall'ambiente a un sistema e viceversa con tre forme: calore, lavoro o trasporto di massa (**Cengel 2009**). Il trasferimento di energia sotto forma di calore avviene per effetto della differenza di temperatura tra due corpi.

Mantenere condizioni ottimali di temperatura all'interno di un ambiente richiede lo studio e la quantificazione dei flussi termici uscenti attraverso le strutture degli edifici durante il periodo invernale e dei flussi termici entranti durante il periodo estivo. E' comprensibile quindi capire come la modifica del rivestimento esterno, come può essere ad esempio quella prodotta dalla giustapposizione di rivestimenti vegetali, possa influire in maniera determinante sul bilancio energetico di un edificio.

E' possibile distinguere tre modalità di trasferimento del calore: conduzione, convezione, irraggiamento. Nella maggior parte delle situazioni queste tre modalità sono concomitanti anche se può accadere che una delle tre modalità sia preponderante (**Bonacina et al. 1989**). Ad esempio il flusso di calore attraverso una parete avviene per convezione ed irraggiamento sulle facce della parete e per conduzione all'interno della parete stessa, e ancora, il passaggio di calore attraverso un materiale poroso avviene per conduzione attraverso il gas e la struttura solida, per convezione nelle celle porose e per irraggiamento tra le facce delle singole celle.

Sinteticamente i tre ben noti meccanismi di conduzione del calore possono essere definiti come segue:

- *Conduzione termica*: questo meccanismo avviene per cessione di energia cinetica da molecole che si trovano in zone ad alta temperatura a molecole che si trovano a bassa temperatura. Nei metalli alla componente cinetica si aggiunge la componente elettronica dovuta al movimento degli elettroni.
- *Convezione termica*: il trasporto di calore per convezione termica si realizza nel momento in cui avviene movimento macroscopico di particelle di fluido. Quindi tale fenomeno si considera in situazione in cui almeno uno dei due mezzi è un fluido. E' possibile distinguere tra *convezione naturale* quando il movimento del fluido avviene per differenza di densità tra parti di fluido e *convezione forzata* quando il movimento delle particelle di fluido è innescato da agenti esterni come un ventilatore o una pompa.

- *Irraggiamento*: la trasmissione di calore avviene per propagazione di onde elettromagnetiche. La peculiarità di questo meccanismo risiede nel fatto che c'è bisogno di un mezzo attraverso cui trasferire calore che può avvenire nel vuoto similmente alla propagazione della luce. Fondamentale però risulta la posizione reciproca delle superfici che scambiano calore e la loro natura.

Tutti e tre questi meccanismi sono coinvolti nello scambio termico di calore che avviene attraverso le pareti dell'involucro edilizio e verranno, di seguito, caratterizzati nel dettaglio nel caso di presenza di rivestimenti vegetali.

3.1.2. CONDUZIONE

Quando avviene passaggio di energia tra due zone a differente temperatura di un corpo solido, liquido, gassoso, senza trasporto di materia siamo in presenza di passaggio di calore per *conduzione*. In particolare la temperatura del singolo elemento di materia è in funzione della sua posizione e dell'istante considerato e gli insiemi dei punti aventi sul corpo la stessa temperatura formano superfici chiamate *isoterme* che hanno anch'esse forma e distribuzione variabili nel tempo.

La trattazione matematica del fenomeno della conduzione termica è fatta su un modello del corpo fisico continuo, uniforme, isotropo e con caratteristiche fisiche invariabili nel tempo e non dipendenti dalla temperatura. In questo contesto, l'osservazione del fenomeno stazionario di trasmissione del calore attraverso un materiale compatto con facce piane e parallele a temperature t_1 e t_2 diverse e costanti è stata descritta con la seguente relazione:

$$Q = \frac{\lambda A}{l} (t_1 - t_2) \Delta\tau \quad (1)$$

in cui Q rappresenta la quantità di energia che fluisce nell'intervallo di tempo $\Delta\tau$ attraverso la sezione A , λ è detta *conducibilità termica* ed è caratteristica del materiale di cui è composto lo strato. La *conducibilità termica*, rappresenta la quantità di calore che fluisce nell'unità di tempo, per unità di spessore per differenza di temperatura unitaria ed è espressa in W/m K.

Il rapporto λ/l è chiamato *conduttanza termica specifica* e il suo inverso è la *resistenza termica specifica* misurata in W/m² K.

In condizioni più generali lo strato piano può essere considerato tra due superfici isoterme parallele rispettivamente a temperatura t e $t+\Delta t$, anche non costanti nel tempo e poste a distanza x e $x+\Delta x$, come visibile in Figura 3.

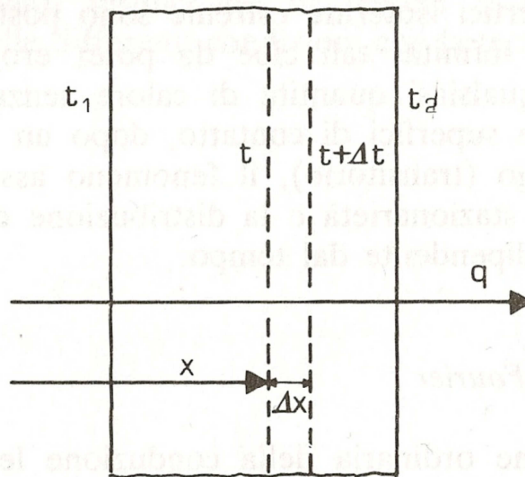


Figura 3 – flusso termico e superfici isoterme

Definito il flusso termico specifico come:

$$q = \lim_{\Delta\tau \rightarrow 0} \frac{Q}{\Delta\tau} \quad (2)$$

Possiamo scrivere la (1) in forma differenziale:

$$q = -\lambda A \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta t}{\Delta x} = -\lambda A \frac{\partial t}{\partial x} \quad (3)$$

Questa è la formulazione della *legge di Fourier* per la conduzione termica. Il segno negativo davanti a λ si utilizza poiché viene considerato positivo il flusso di calore nel senso positivo delle ascisse, che invece genererebbero un rapporto $\partial t / \partial x < 0$.

Il calcolo della quantità di calore scambiata attraverso il meccanismo di conduzione è quindi in funzione della distribuzione delle temperature nel mezzo considerato. Per poter determinare tale funzione si ricorre al *principio di conservazione dell'energia* secondo l'espressione:

$$dQ_e + dQ_g = dU \quad (4)$$

dove dQ_e è la quantità netta di calore scambiata, dQ_g è la quantità di calore generata internamente dal sistema e dU è la variazione di energia interna del sistema. Considerando che dQ_e si può esprimere integrando sull'elemento di area infinitesimo dA il vettore del flusso termico specifico q^* , che dQ_g si può esprimere integrando su un volume V l'intensità di generazione interna H e che la variazione di energia interna dU si trova integrando sul medesimo volume V il prodotto del calore specifico c per la densità ρ si può ottenere, opportunamente espressa in termini vettoriali, l'*equazione generale della conduzione termica*:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\lambda}{\rho c} \nabla^2 t + \frac{H}{c\rho} \quad (5)$$

La (5) può quindi assumere diverse forme considerando i seguenti casi:

- nessuna generazione interna di calore: equazione di Fourier, già precedentemente descritta in termini finiti.
- temperatura è costante nel tempo: equazione di Poisson

- senza generazione interna di calore e con temperatura costante nel tempo: equazione di Laplace

La soluzione dell'equazione (5), descritta con il metodo delle *differenze* finite, permette di determinare le temperature in ogni punto del dominio e di calcolare il flusso termico attraverso le superfici, previa conoscenza delle condizioni al contorno che possono essere riassunte in tre tipologie:

- *primo tipo*: è fissata la temperatura sulle superfici del dominio. Tale condizione è detta condizione di *Dirichlet*
- *secondo tipo*: è fissata la derivata della temperatura normale alla superficie
- *terzo tipo*: è fissata una combinazione lineare tra la temperatura della superficie e la derivata della temperatura normale alla superficie stessa. Tale condizione è detta condizione di *Neumann*.

Nel caso del bilancio termico della parete vegetale è stata utilizzata, per la modellazione numerica, la forma di Fourier con condizione al contorno del primo tipo di Dirichlet. A titolo di esempio si riporta l'equazione di un nodo tipo T_1 in cui avviene scambio termico per conduzione con un nodo adiacente T_2 :

$$\frac{\rho_1 c_1 \frac{l_1}{2} (T_1 - T_1^0)}{\Delta\tau} = \frac{\lambda_1}{l_1} (T_2 - T_1) \quad (6)$$

Tramite la (6) è possibile esplicitare la temperatura del nodo in esame conoscendo le proprietà termofisiche dello stesso nodo T_1 , la sua temperatura all'istante temporale precedente T_1^0 e la temperatura del nodo adiacente T_2 . Nel caso particolare del rivestimento vegetale il meccanismo di conduzione è stato considerato per tutti i componenti aventi un'inerzia non trascurabile. Nella fattispecie:

- la parete opaca di supporto alla struttura del giardino verticale
- la struttura di supporto del giardino

Non è stata considerata conduzione termica all'interno delle più piccole componenti del giardino come le foglie o i feltri del substrato poiché considerata ininfluenza ai fini del calcolo complessivo.

La trattazione completa della modellazione numerica è descritta al capitolo 5.

3.1.3. CONVEZIONE

Altro meccanismo fondamentale per lo scambio di calore tra due corpi posti a contatto tra loro è la convezione. Questo particolare meccanismo presuppone che almeno uno dei due corpi sia un fluido e nel caso dello studio dei fenomeni di trasmissione di calore legati all'energetica degli edifici il fluido considerato è nella maggior parte dei casi l'aria. Ciò ovviamente non toglie l'esistenza di scambi convettivi anche tra liquido e liquido o liquido e gas. La condizione però indispensabile affinché avvenga scambio convettivo tra un solido e il fluido che lo lambisce è che il fluido sia in movimento, diversamente avverrebbe solo conduzione termica.

In generale il meccanismo di convezione può essere suddiviso in due tipologie:

- *convezione forzata*: quando il moto del fluido è prodotto da dispositivi meccanici
- *convezione naturale*: quando il moto del fluido nasce da gradienti di densità dovuti a gradienti di temperatura del fluido.

Nel caso dei rivestimenti di facciata e nella fattispecie dei giardini verticali esterni l'aria che lambisce la parete dell'edificio all'interno dell'intercapedine che si crea a seguito dell'installazione del rivestimento è a tutti gli effetti assimilabile al fluido in movimento per convezione naturale. Il primissimo strato d'aria adiacente alla parete assorbe da essa il calore con un meccanismo ancora di tipo conduttivo legato all'energia cinetica molecolare, ma, a differenza dei sistemi in quiete, in funzione del moto del fluido a contatto con la superficie. Lo strato d'aria trasferisce poi l'energia ricevuta dalla parete agli strati di fluido attigui e più esterni. E' in questi strati che l'energia interna molecolare rimane costante in un bilancio in cui l'energia entrante (in arrivo ad esempio dalla parete) è bilanciata all'energia uscente dovuta in parte ai meccanismi legati al moto del fluido, attraverso i quali le particelle d'aria in movimento trasportano anche l'energia interna, ed in parte ancora una volta alla conduzione a livello molecolare. Quando infatti le particelle in movimento vengono a contatto con particelle più fredde, trasferiscono ad esse energia termica. Tutto questo accade in un continuo movimento legato al tipo di moto del fluido.

Nella parete con normale orientata verso il fluido si ha, secondo l'equazione introdotta da Newton:

$$q = h_c A (t_p - t_f) \quad (7)$$

Il termine α è detto *coefficiente di convezione termica* ed espresso in $W/m^2 K$ e risulta in funzione delle proprietà del fluido e delle caratteristiche geometriche del sistema.

Nel caso dell'analisi dell'intercapedine ventilata presente nei rivestimenti vegetali, se essa risulta aperta e quindi sede di fenomeni convettivi di significativa natura, il coefficiente di scambio termico convettivo h_c può essere calcolato come indicato in normativa (UNI EN ISO 6946 2008) secondo la relazione:

$$h_c = 4 + 4v \quad (1)$$

Dove v rappresenta la velocità dell'aria, in questo caso nell'intercapedine.

La velocità del fluido non è di facile determinazione. In alcuni casi essa può essere misurata con opportuni strumenti come anemometri a filo caldo o a termistore, ma tale condizione non è facilmente realizzabile e soprattutto non consente di effettuare valutazioni prima dell'installazione del rivestimento. In questo caso è necessaria una modellazione numerica anche dell'intercapedine ventilata che verrà trattata nel relativo capitolo 5. Attraverso tale sistema sarà allora possibile stimare la velocità dell'aria e di conseguenza il flusso di calore per convezione tra la parete e il fluido che la lambisce.

Come descritto in precedenza il LW-GaOp è dotato di intercapedine aperta all'estremità inferiore e superiore e in cui l'aria esterna può fluire, mentre il LW-GrCl ha un'intercapedine dimensionalmente simile al caso precedente, ma non dotata di aperture e quindi si assume che non ci siano flussi d'aria esterna di portata considerevole all'interno dell'intercapedine.

Tale differenza, porta ad un differente calcolo della portata d'aria nell'intercapedine dei due *Living Walls*. Nel primo caso di LW-GaOp la portata d'aria verrà stimata tenendo in considerazione entrambe le forzanti che generano il movimento dell'aria: vento e gradiente termico. Le equazioni utilizzate nella modellazione numerica, esplicitata al capitolo 5, sono le seguenti (U.S. DOE 2010):

$$\dot{V}_{vento} = C_v \cdot A_{in} \cdot v_{vento} \quad (2)$$

$$\dot{V}_{gradiente} = C_d \cdot A_{in} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot g \cdot \Delta H \cdot (\theta_{cav} - \theta_{amb})}{\theta_{cav}}} \quad (3)$$

Il coefficiente di pressione C_v per l'ingresso e l'uscita dell'aria nella cavità dipende dalla direzione del vento rispetto all'orientamento del muro. Nel caso della parete vegetale con intercapedine aperta, è stato utilizzato un valore di 0.25 considerando venti mediamente trasversali e l'effetto schermante dovuto all'ambiente costruito circostante (**ASHRAE HoF 2005**).

I venti del microclima locale sono stati calcolati considerando i dati di velocità del vento della più vicina stazione climatica e le caratteristiche del terreno circostante.

Il coefficiente di scarico C_d dipende dalla geometria e dalla turbolenza del moto dell'aria. Nel caso della modellazione numerica più avanti descritta è stato utilizzato un valore pari a 0.3 (**Kiel and Wilson 1986**).

Δh rappresenta la distanza dall'apertura più bassa alla quota del piano neutro (NPL). In questo caso, considerando aperture uniformi all'estremità inferiore e superiore dell'intercapedine d'aria, l'altezza del piano neutro è stata considerata pari a metà dell'altezza del *Living Wall*.

Per il secondo caso di *Living Wall*, LW-GrCl, lo scambio termico per convezione all'interno della cavità d'aria è stato calcolato considerando il coefficiente di convezione nelle cavità chiuse secondo la (**UNI EN 673 2011**):

$$h_{conv} = Nu \frac{\lambda_{gas}}{s_{cavità}} \quad (4)$$

La conducibilità termica dell'aria (λ) è 0.026 W/ (m K) e lo spessore della cavità (s) è 0.05 m sia per il LW-GaOp che per il LW-GrCl.

3.1.4. IRRAGGIAMENTO

Il terzo meccanismo di scambio di calore è la radiazione termica. Qualsiasi corpo sia esso solido, liquido o gassoso, che si trovi ad una temperatura superiore allo 0 K, emette radiazione termica sotto forma di radiazioni elettromagnetiche. Parimenti i corpi oltre ad emettere radiazione la possono ricevere, innescando così un meccanismo di *scambio termico per irraggiamento*. Risulta quindi chiaro che l'intensità dello scambio termico per radiazione è in funzione di alcuni parametri tra i quali la temperatura che riveste un ruolo di fondamentale importanza.

La radiazione termica ha lunghezze d'onda che vanno da 0.1 μm a 100 μm . L'immagine dello spettro elettromagnetico con l'evidenza dell'intervallo di lunghezze d'onda in cui agisce la radiazione termica è riportato in Figura 4.

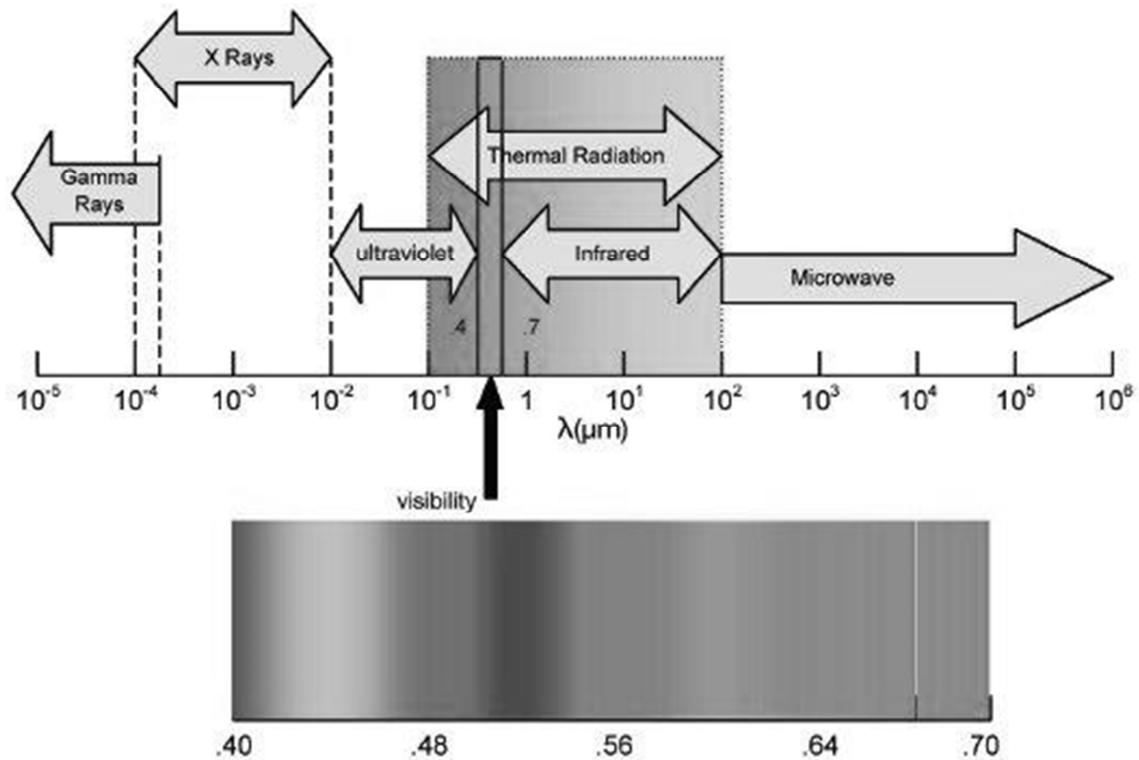


Figura 4 – Spettro radiazione elettromagnetica e individuazione intervallo radiazione termica

L'intensità di emissione globale, è espressa per un corpo nero verso il vuoto dalla legge di Stefan-Boltzmann secondo seguente relazione:

$$(E_n) = \sigma_n T^4 \quad (5)$$

con $\sigma_n = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}^4)$ costante di radiazione del corpo nero e T temperatura assoluta del corpo.

Fatta questa premessa è importante considerare i coefficienti emisferici globali vista l'importanza che rivestono anche nell'analisi dei rivestimenti degli edifici.

Il rapporto tra la potenza assorbita, riflessa, trasmessa e quella incidente definisce rispettivamente il coefficiente di assorbimento (α), riflessione (ρ) e trasmissione (τ) emisferico globale. I tre coefficienti possono assumere valori compresi tra 0 e 1 e tra di essi deve essere rispettata la condizione: $\alpha + \rho + \tau = 1$. Nel caso specifico del rivestimento vegetale si sono inizialmente considerati i seguenti coefficienti da letteratura (Stec et al. 2005):

- assorbimento $\alpha = 0.45$
- trasmissione $\tau = 0.45$
- riflessione $\rho = 0.10$

durante la fase di modellazione esplicitata nel capitolo 5 tuttavia si sono ipotizzati altri coefficienti più in linea con i valori misurati e simili a quelli in Figura 5.

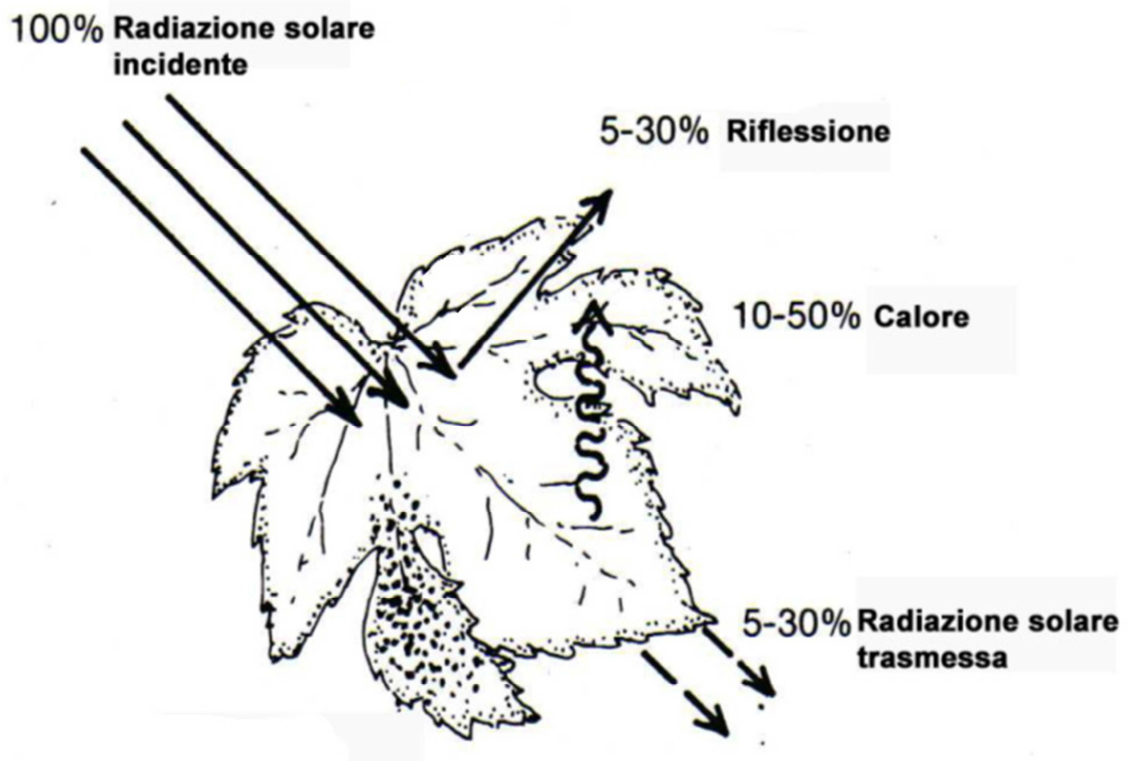


Figura 5 – Bilancio energetico foglia

Per calcolare il flusso termico scambiato tra più superfici a diversa temperatura e non separate da un mezzo assorbente è necessario introdurre il concetto di *fattore di forma*. In generale se si considerano due superfici A e B, si possono definire i fattori di forma come segue:

- F_{A-B} : frazione della potenza radiante che dalla superficie A raggiunge la superficie B.
- F_{B-A} : frazione della potenza radiante che dalla superficie B raggiunge la superficie A.

Di conseguenza è possibile calcolare q_{AB} ossia la potenza emessa dalla superficie A ed integralmente assorbita dalla superficie B dalla seguente relazione:

$$(q_{AB}) = A_A F_{A-B} (E_A) \quad (6)$$

Combinando la (5) e la (6) è possibile ricavare una relazione generale anche in virtù della relazione di reciprocità dei fattori di forma:

$$(q_{AB}) = A_A F_{A-B} \sigma (T_1^4 - T_2^4) = A_B F_{B-A} \sigma (T_1^4 - T_2^4) \quad (7)$$

Nel modello di simulazione sono stati considerati i fattori di forma delle superfici verticali piane e parallele formanti l'intercapedine e quelli relativi alla superficie esterna in rapporto alla vegetazione, alla volta celeste e al suolo come segue e in riferimento alla Figura 6:

- $F_{1-2} \approx 1$
- $F_{2-1} \approx 1$
- $F_{3-s} = 0.5$
- $F_{3-1} \approx 1$
- $F_{3-g} = 0.5$

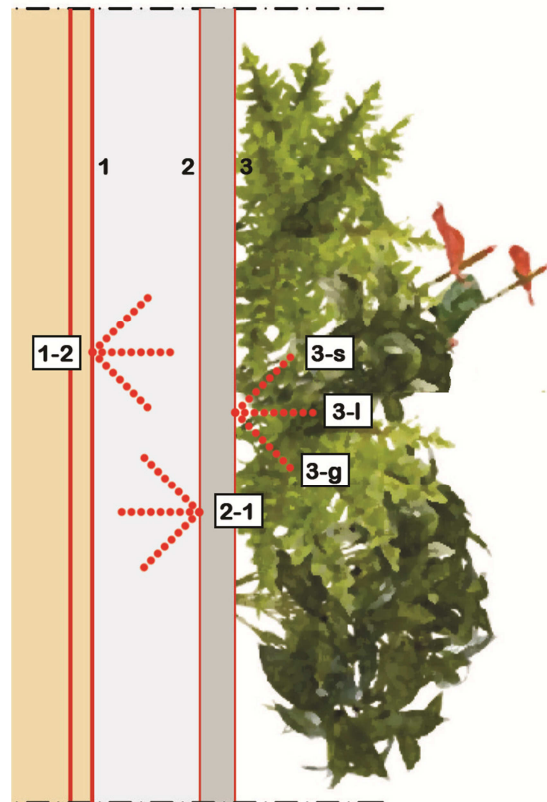


Figura 6 – Rapporto tra le superfici (s=sky, l=leaves, g=ground)

Nel caso dello scambio radiante tra le superfici 1 e 2 di Figura 6 si è trascurato l'effetto di bordo e il calcolo è stato effettuato a partire dalla relazione:

$$q_{12} = A \frac{\sigma_n (T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} \quad (8)$$

successivamente linearizzata con la relazione:

$$q_{12} = A \sigma_{1-2} T_m^3 (T_1 - T_2) \quad (9)$$

I valori di emissività reperiti in letteratura (Rubio et al. 1997) per diverse specie vegetali sono visibili in **Figura 7**. In particolare è stato scelto di considerare il valore di 0.95 preso per la vegetazione di tipo Sedum in analogia con la piante usate spesso nei rivestimenti vegetali. Per i materiali edilizi è stato usato il valore standard di emissività pari a 0.90. I valori indicati sono stati usati nell'equazione (8) in tutti gli scambi radiativi ipotizzati nella modellazione numerica.

Vegetation Samples	Characteristics	$\varepsilon \pm \sigma_\varepsilon$ (8.0–14.0 μm)
Herbaceous species:		
<i>Sedum</i> sp.		0.942±0.011
<i>Oxalis acetosella</i>	Yellow and dry grass	0.952±0.012
<i>Schoenus nigricans</i> L.		0.959±0.009
<i>Hordeum vulgare</i> L.	Over dry calcareic cambisol soil	0.959±0.011
<i>Hordeum vulgare</i> L.	Over irrigated petric calcisol soil	0.965±0.008
<i>Zea Mays</i> L.	Over dry petric calcisol soil	0.968±0.009
<i>Zea Mays</i> L.	Over wet petric calcisol soil	0.983±0.005
<i>Brachypodium retusum</i> (Pers.) Beauv.	Dry biomass	0.974±0.007
<i>Brachypodium retusum</i> (Pers.) Beauv.	Semidry	0.978±0.010
<i>Brachypodium pinnatum</i> (L.) Beauv.	Dry grassland	0.990±0.005
Litterfall of <i>Avena</i> sp. pl.	Over calcareic regosol	0.975±0.011
Litterfall of <i>Avena</i> sp. pl.	Over calcareic regosol	0.977±0.003
<i>Oxalis pes-cabrae</i>	Green color, short grass	0.976±0.008
Alfalfa: <i>Medicago sativa</i> L.	Over haplic calcisol soil	0.977±0.008
Alfalfa: <i>Medicago sativa</i> L.		0.987±0.004
<i>Aphyllantes monspeliensis</i>		0.990±0.004
<i>Brachypodium pinnatum</i>		0.990±0.005
<i>Vicia faba</i> L.		0.991±0.003
Herbaceous lawn	Golf course	0.991±0.006
Shrub:		
Rosemary: <i>Rosmarinus officinalis</i> L.		0.975±0.007
Rosemary: <i>Rosmarinus officinalis</i> L.		0.990±0.004
Juniper: <i>Juniperus oxycedrus</i> L.		0.981±0.006
Vine: <i>Vitis vinifera</i> L.		0.985±0.003
Albaida: <i>Anthyllis cytisoides</i> L.		0.990±0.004
<i>Ononis tridentata</i> L.		0.990±0.004
<i>Linum sufruticosum</i> L.		0.990±0.004
<i>Ditrichia viscosa</i> (L.) W. Greuter		0.990±0.004
Box: <i>Buxus sempervivens</i> L.	Over dry, base-rich soil	0.991±0.006
Tree:		
<i>Olea europaea</i> L.		0.976±0.006
Downy oak: <i>Quercus pubescens</i> Will.		0.970±0.008
Pine: <i>Pinus nigra</i> Arnold.		0.982±0.009
Thompson orange tree	20 years old	0.985±0.005
Holm oak: <i>Quercus ilex</i> L.		0.985±0.010
Navel orange tree	15 years old	0.987±0.005
Downy oak: <i>Quercus pubescens</i>		0.987±0.007

Figura 7 – Tabella emissività vegetazione

3.2. LA RADIAZIONE SOLARE

Uno dei principali vantaggi nell'installazione di rivestimenti vegetali è l'effetto schermante che essi offrono a protezione dalla radiazione solare. In questa sezione a seguito di una breve introduzione sui principali concetti legati alle componenti della radiazione solare e alla geometria solare, con l'obiettivo di stabilire una terminologia adeguata legata alla modellazione numerica sviluppata al capitolo 5, verranno evidenziati i contributi della radiazione solare su superfici diversamente esposte. Tali apporti, come accennato, sono fortemente correlati agli effetti provocati dalla presenza dei rivestimenti vegetali sulle pareti degli edifici.

3.2.1. COMPONENTI DELLA RADIAZIONE E CENNI DI GEOMETRIA SOLARE

Inizialmente è necessario individuare le principali componenti della radiazione solare. E' possibile infatti suddividere la radiazione solare in 2 componenti fondamentali:

- radiazione diretta
- radiazione diffusa

La *radiazione diretta* è definita come la radiazione che arriva direttamente dal sole senza aver subito processi di scattering dall'atmosfera. Al contrario la *radiazione diffusa* è definita come la radiazione che arriva

dal sole dopo che la sua direzione ha subito processi di scattering dovuti all'aerosol atmosferico (**Duffie and Beckman 2005**). I due tipi di radiazione sono rappresentati in Figura 8a.

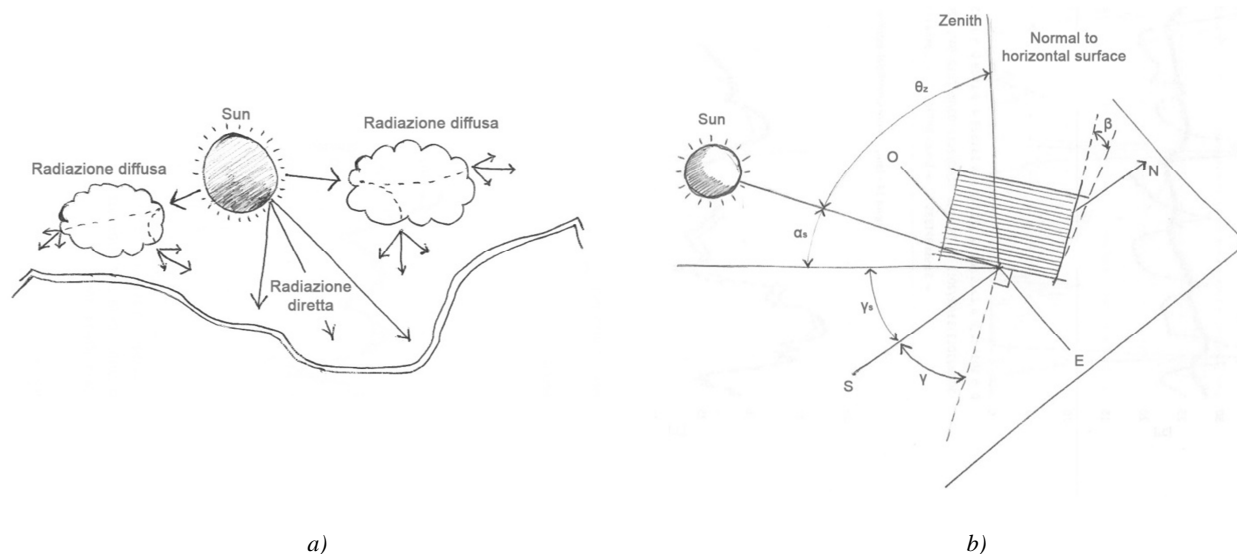


Figura 8 – Radiazione solare. a) Tipi di radiazione solare; b) angoli legati alla geometria solare

La radiazione diretta, quando disponibile in giornate soleggiate con atmosfere limpide, segue le leggi dell'ottica e in generale la relazione geometrica tra un piano con orientamento qualsiasi rispetto alla terra e in qualsiasi momento temporale e la radiazione diretta, cioè la posizione del sole relativamente a quel piano può essere descritta con alcuni angoli (**Benford and Bock 1939**).

I principali angoli legati alla geometria solare sono indicati in Figura 8b. In particolare:

- θ_z – **Angolo di Zenith**. Angolo tra la normale al piano orizzontale e la linea congiungente il sole. Coincide con l'angolo di incidenza della radiazione diretta su una superficie orizzontale
- α_s – **Angolo di altezza solare**. Il complementare a 90° dell'angolo di Zenith
- γ_s – **Angolo di azimuth solare**. Angolo formato dalla proiezione della radiazione diretta al suolo e il Sud
- γ – **Angolo di azimuth della superficie**. Angolo formato dalla proiezione della normale alla superficie su un piano orizzontale e il Sud
- β – **Angolo di inclinazione**. Angolo di inclinazione della superficie rispetto all'orizzontale

Il modello numerico proposto al capitolo 5 ha tra i vari input anche la radiazione solare. Nel presente lavoro, la radiazione utilizzata nel modello, al fine della validazione, è quella misurata durante le varie campagne di monitoraggio, tuttavia può essere utilizzato un valore calcolato a partire da dati generici di radiazione solare come quelli ottenibili da files climatici orari. La corretta quantità di radiazione incidente su una parete comunque orientata ed inclinata può essere calcolata sulla base di equazione trigonometriche basate sulla geometria solare a partire dai dati di radiazione globale su piano orizzontale e di radiazione diffusa su piano orizzontale. Se dovessero mancare tali dati è possibile ricavare valori di radiazione diffusa e diretta anche partendo da altri valori di input come ad esempio la radiazione normale diretta secondo diversi modelli numerici che hanno però lo svantaggio di una minore accuratezza (**Del Col 2013**).

3.2.2. CONSIDERAZIONI SU DIFFERENTI ORIENTAMENTI DEI LIVING WALLS

Come accennato l'effetto di protezione dei rivestimenti vegetali è tanto più forte quanto la radiazione incidente è maggiore. In questo senso l'orientamento della superficie gioca un ruolo fondamentale. Vengono di seguito riportate le quantità totali di radiazione collezionata da una superficie diversamente orientata in tre differenti latitudini. I casi riportati riguardano la stagione estiva per i 4 principali orientamenti: Nord, Est, Sud ed Ovest e per le località di Verona, Roma e Messina. Come è possibile notare dalla Figura 9a, la superficie più esposta e in grado di raccogliere una maggior quantità di radiazione solare durante il periodo estivo è la superficie a Sud. Tale orientamento ha il medesimo comportamento a tutte le latitudini analizzate. Nel dettaglio, esposto in Figura 9b, la superficie a Sud raccoglie una notevole quantità di radiazione durante molte ore della giornata, alle medie latitudini (42°N), dalle ore 6 circa alle ore 20 circa con picchi di 450 W/m². Nonostante le superfici ad Est ed Ovest siano sottoposte a picchi di radiazione paragonabili a quelli ricevuti dalla superficie a Sud, circa 400 W/m², non ricevono radiazione ad elevata intensità per tempi lunghi durante la giornata. E' ben visibile il picco verso le ore 9 e verso le ore 16 delle superfici ad Est ed Ovest rispettivamente. E' quindi preferibile l'installazione dei rivestimenti vegetali su superfici con orientamento a Sud, in tal modo viene massimizzata la protezione solare offerta dal rivestimento. Si ricorda che i monitoraggi microclimatici esposti al capitolo 4 sono stati effettuati, in entrambi i casi, per *Living Walls* installati su superfici orientate a Sud-Ovest. Tale condizione ha permesso di monitorare il comportamento nelle condizioni di irraggiamento più intense.

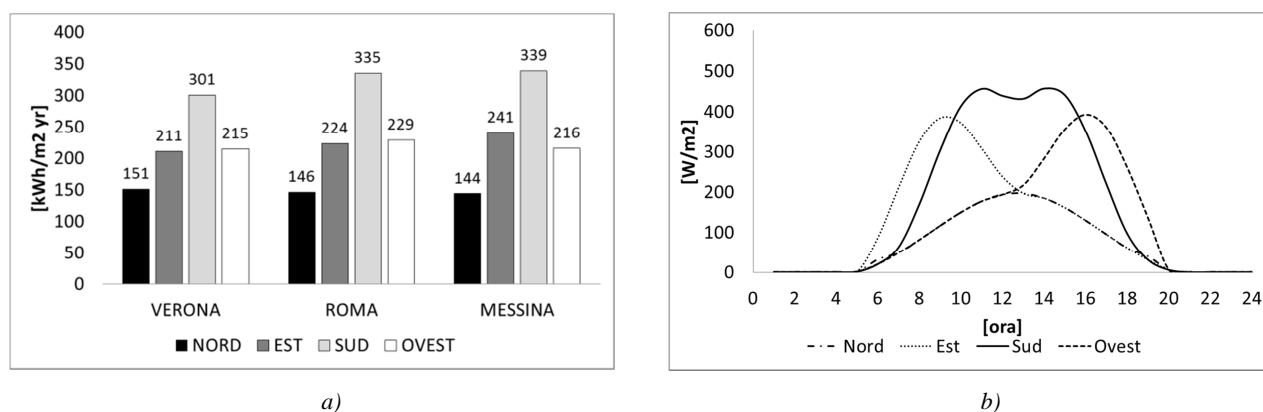


Figura 9 – Radiazione solare. a) Radiazione collezionata da una superficie verticale per diversi orientamenti e latitudini; b) Radiazione solare oraria collezionata al solstizio estivo da una superficie verticale diversamente orientata alle medie latitudini

3.3. EVAPOTRASPIRAZIONE

Lo studio di tale fenomeno consentirà di capire la quantità d'acqua evaporata dalla superficie vegetale durante una tipica giornata estiva. Tale informazione è fondamentale per poter quantificare l'energia assorbita dal fenomeno evaporativo e quindi sottratta alla superficie verde, soprattutto in relazione alla creazione e validazione del modello matematico per il living wall sviluppato nel capitolo 5.

La combinazione di due processi separati in base a cui l'acqua viene dispersa, per una parte, dalla superficie del terreno o dalle foglie per *evaporazione*, e per l'altra parte, dalle piante per *traspirazione*, è chiamata *evapotraspirazione* (Allen et al. 1998).

Il processo mediante il quale l'acqua passa dallo stato liquido a quello gassoso è chiamato *evaporazione*. Il medesimo processo avviene su tutte le superfici sulle quali è presente acqua come, ad esempio, laghi, fiumi, pavimentazioni, terreni e vegetazione umida. L'energia necessaria per il passaggio di stato è fornita principalmente dalla radiazione solare e dall'aria circostante che si trova ad una certa temperatura. Il passaggio di vapore dalla superficie all'aria avviene per la presenza di un gradiente pressorio tra la pressione di vapore vicino alla superficie e la pressione di vapore dell'aria ambiente. Durante il processo di evaporazione l'aria in prossimità della superficie si satura e, in mancanza di movimento, il processo si stabilizza. Per riattivare il processo è necessaria la presenza di movimento d'aria, banalmente può essere vento, che sostituisce l'aria satura con nuova aria più secca. L'evaporazione è influenzata anche da altri fattori come il grado di schermatura del suolo e la disponibilità di acqua sulla superficie.

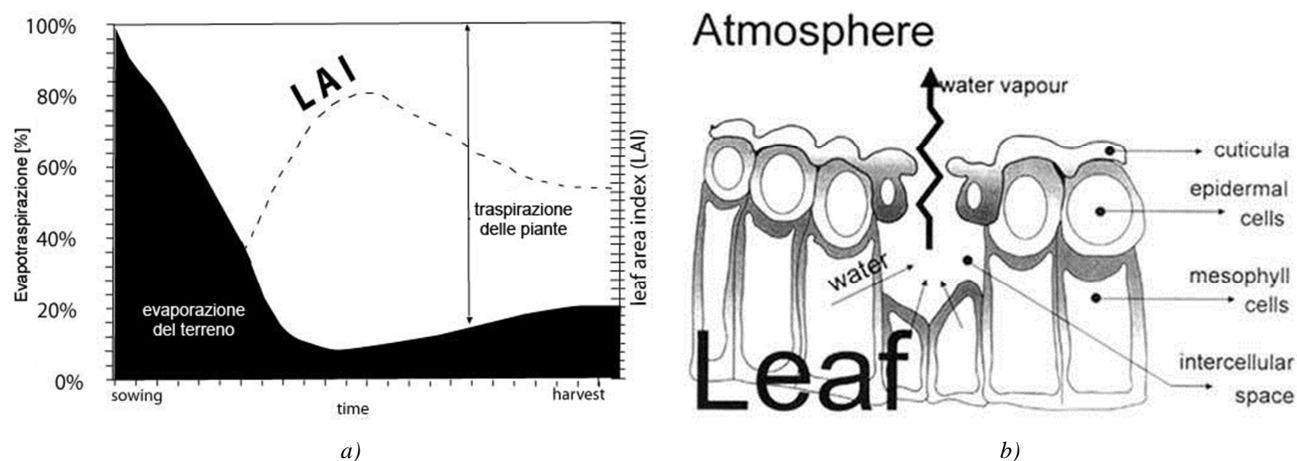


Figura 10 – Il fenomeno dell'evapotraspirazione. a) Relazione tra evaporazione e traspirazione in funzione del Leaf Area Index; b) Schema di una foglia. Nello spazio intracellulare avviene il passaggio di stato dell'acqua

L'altro processo coinvolto è la *traspirazione*, che differisce dall'evaporazione sostanzialmente per il fatto che il cambiamento di fase dell'acqua avviene all'interno della pianta e la migrazione del vapore dalla pianta all'atmosfera avviene prevalentemente attraverso gli *stomi*, delle piccole aperture che consentono gli scambi gassosi sia in uscita che in entrata dalle foglie della pianta. Quasi tutta l'acqua che la pianta assume attraverso le radici viene eliminata attraverso la traspirazione e solo una piccola parte rimane all'interno della pianta stessa. Anche in questo caso, il tasso di traspirazione dipende da fattori quali l'energia fornita, la differenza di pressione parziale di vapore, l'eventuale presenza di vento e ovviamente dal tipo di specie.

Non è possibile distinguere le due fasi di evaporazione e traspirazione, che quindi vengono considerate simultanee. Come mostrato anche in Figura 10a, i due fenomeni sono contemporanei e all'inizio, quando la vegetazione è in crescita, il fenomeno più evidente è l'evaporazione, poi, man mano che la vegetazione si sviluppa coprendo in maniera più completa lo strato di terreno sottostante (aumento del Leaf Area Index),

l'evaporazione diminuisce a favore di più alti valori di traspirazione. In Figura 10b è possibile vedere il percorso di traspirazione dell'acqua attraverso gli stomi della pianta.

Interessanti considerazioni possono essere fatte in merito all'energia necessaria per permettere l'evapotraspirazione dell'acqua nelle piante. Normalmente l'evapotraspirazione viene misurata in mm d'acqua per unità di tempo (mm_{H₂O}/ora, mm_{H₂O}/giorno, mm_{H₂O}/mese, ecc.), ma possiamo esprimere tale grandezza anche in termini di energia, più precisamente il calore latente di evaporazione dell'acqua a 20°C è circa 2450 kJ/kg_{H₂O}. Ciò significa che, ad esempio, se il tasso di evapotraspirazione di una certa specie seminata su una superficie di 100 m², è di 2 mm/giorno, e quindi di 0,2 m³ o di 200 kg di acqua al giorno, l'energia necessaria associata al processo di evapotraspirazione sarà pari a circa 500 MJ ovvero di 5 MJ/m².

Nel documento elaborato dalla FAO vengono introdotte alcune distinzioni tra il valore di evapotraspirazione di riferimento ET₀, quello in condizioni standard ET_c, e quello in condizioni non standard ET_{c,adj}. In questa sede si prenderanno in considerazione gli indici ET₀ e ET_c.

3.3.1. INDICE EVAPOTRASPIRATIVO DI RIFERIMENTO ET₀

Il valore ET₀ è il tasso di evapotraspirazione che prende come superficie di riferimento un *prato* con caratteristiche specifiche accettate dal *FAO Expert Consultation on Revision of FAO Methodologies for Crop Water Requirements*, nel dettaglio:

- altezza della prato 0,12 m
- resistenza di superficie 70 s m⁻¹
- albedo 0,23.

questo sistema è stato introdotto per studiare il potenziale evaporativo dell'atmosfera indipendentemente dalle caratteristiche della coltura. Collegando il tasso di evapotraspirazione ad una superficie specifica, in questo caso il prato (in cui l'indice ET₀ dipende solo da parametri climatici), è possibile confrontare diverse superfici con il caso di riferimento ed ottenere un'indicazione più chiara della potenzialità di una determinata coltura. In altri termini l'indice ET₀ esprime il *potere evaporativo* dell'atmosfera in una località specifica e il metodo *FAO Penman-Monteith* è quello indicato per la sua determinazione. Alti valori dell'indice di riferimento indicano che, ad esempio, in *climi caldo secchi* ci sono elevati consumi di acqua per evapotraspirazione dovuti all'abbondanza di energia e al potere essiccato dell'atmosfera. In *climi umidi*, invece, nonostante l'eventuale elevata presenza di energia radiante dal sole, la richiesta di evapotraspirazione è notevolmente ridotta.

E' necessario ricordare che per l'evapotraspirazione è necessaria una grande quantità di energia ed è quindi possibile applicare il principio di conservazione dell'energia sulla superficie della coltura. In Figura 11 è rappresentata la variazione diurna delle componenti del bilancio energetico così espresso:

$$R_n - G - \lambda ET - H = 0 \quad (10)$$

dove R_n è la radiazione netta, H il calore sensibile, G il flusso di calore dal terreno e λET il flusso di calore latente.

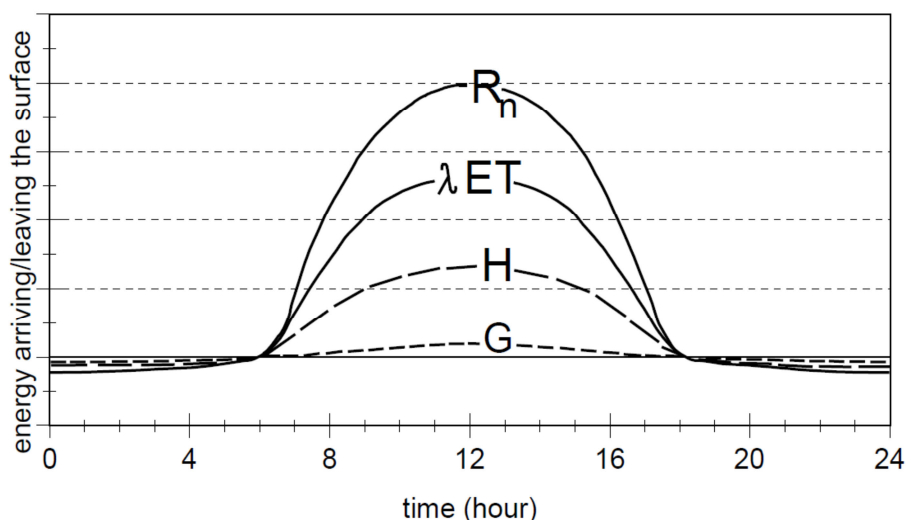


Figura 11 – Bilancio di energia su una superficie ben irrigata in una giornata di sole

Dall'equazione originale di Penman-Monteith e dalle equazioni per il calcolo delle resistenze aerodinamiche e superficiali è stata sviluppata l'equazione *FAO Penman-Monteith*, per il calcolo del tasso di evapotraspirazione di riferimento e di seguito riportata:

$$ET_0 = \frac{0,408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34u_2)} \quad (11)$$

dove Δ è l'inclinazione (coefficiente angolare) della curva della pressione di vapore [$\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$], R_n è la radiazione netta sulla superficie verde [$\text{MJ m}^{-2} \text{giorno}^{-1}$], G è il flusso di calore dal suolo [$\text{MJ m}^{-2} \text{giorno}^{-1}$], γ è la costante psicrometrica [$\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$], T è la temperatura media giornaliera presa a 2 m di altezza [$^\circ\text{C}$], u_2 è la velocità del vento a 2 m di altezza [m s^{-1}], e_s è la pressione di saturazione del vapore [kPa], e_a è la pressione di vapore attuale [kPa].

Ulteriori considerazioni sono necessarie in merito ad alcuni parametri climatici:

- velocità del vento [u_2]: in climi secchi maggiore è la velocità del vento maggiore sarà la richiesta evapotraspirativa dell'atmosfera. In climi umidi l'evapotraspirazione è pressoché simile per velocità del vento da 0 a 3 m/s.
- pressione atmosferica P [kPa]: viene calcolata con una formula semplificata, in relazione all'altitudine della località:

$$P = 101,3 \left(\frac{293 - 0,0065z}{293} \right)^{5,26} \quad (12)$$

dove z è l'altitudine sopra il livello del mare [m]

- calore latente di vaporizzazione: poiché il valore di γ varia poco all'interno dei range di temperatura in cui vivono normalmente le piante, è possibile considerare un singolo valore pari a 2,45 MJ/kg come indicato nelle semplificazioni date dalla FAO.

- costante psicrometrica $[\gamma]$: il valore della costante psicrometrica varia in funzione di pressione atmosferica, calore latente di vaporizzazione, calore specifico e peso del vapor d'acqua rispetto all'aria secca. Per altitudini prossime al livello del mare si può considerare un valore di $[\gamma]$ pari a $0,067 \text{ kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$.
- pressione di saturazione del vapore $[e_s]$: viene calcolata dalla relazione seguente:

$$e_s = 0,6108e^{\left(\frac{17,27 T}{T+237,3}\right)} \quad (13)$$

dove T è la temperatura dell'aria $[^\circ\text{C}]$.

- inclinazione della curva di saturazione del vapore $[\Delta]$: l'inclinazione in funzione della temperatura è data dalla relazione:

$$\Delta = \frac{4098 \left[0,6108e^{\left(\frac{17,27 T}{T+237,3}\right)} \right]}{(T + 237,2)^2} \quad (14)$$

dove T è la temperatura dell'aria $[^\circ\text{C}]$

- pressione di vapore $[e_a]$: viene calcolata sfruttando al relazione tra la pressione di saturazione e l'umidità relativa secondo l'equazione $e_a = e_s \varphi$.
- flusso di calore verso il suolo $[G]$: essendo il flusso di calore dalle piante verso il suolo, piccolo rispetto all'entità del flusso radiativo dal sole, in particolare quando il terreno è ricoperto da vegetazione con LAI elevato, può essere trascurato e ridotto a 0.
- velocità vento a 2m $[u_2]$: tra i numerosi metodi esistenti per l'adeguamento della velocità del vento rispetto ad una altezza di riferimento, il metodo della FAO propone la seguente relazione:

$$u_z = u_2 \frac{4,87}{\ln(67,8z - 5,42)} \quad (15)$$

dove u_z è la velocità del vento all'altezza z [m/s]

A questo punto è possibile determinare il tasso di evaporazione di riferimento in funzione dei dati meteorologici e con timestep orario. A questo proposito si riporta la variazione dell'equazione di Penman-Monteith per il calcolo orario:

$$ET_0 = \frac{0,408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{37}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34u_2)} \quad (16)$$

In Figura 12 si riportano, a titolo di esempio, i valori dell'indice ET_0 per la località dio Lonigo (VI) in cui è installato uno dei due prototipi oggetto di analisi del presente lavoro. Il periodo considerato riguarda le ultime due settimane del mese di Agosto, dal 15 al 29 Agosto 2011, periodo per il quale tutte le variabili monitorate erano disponibili.

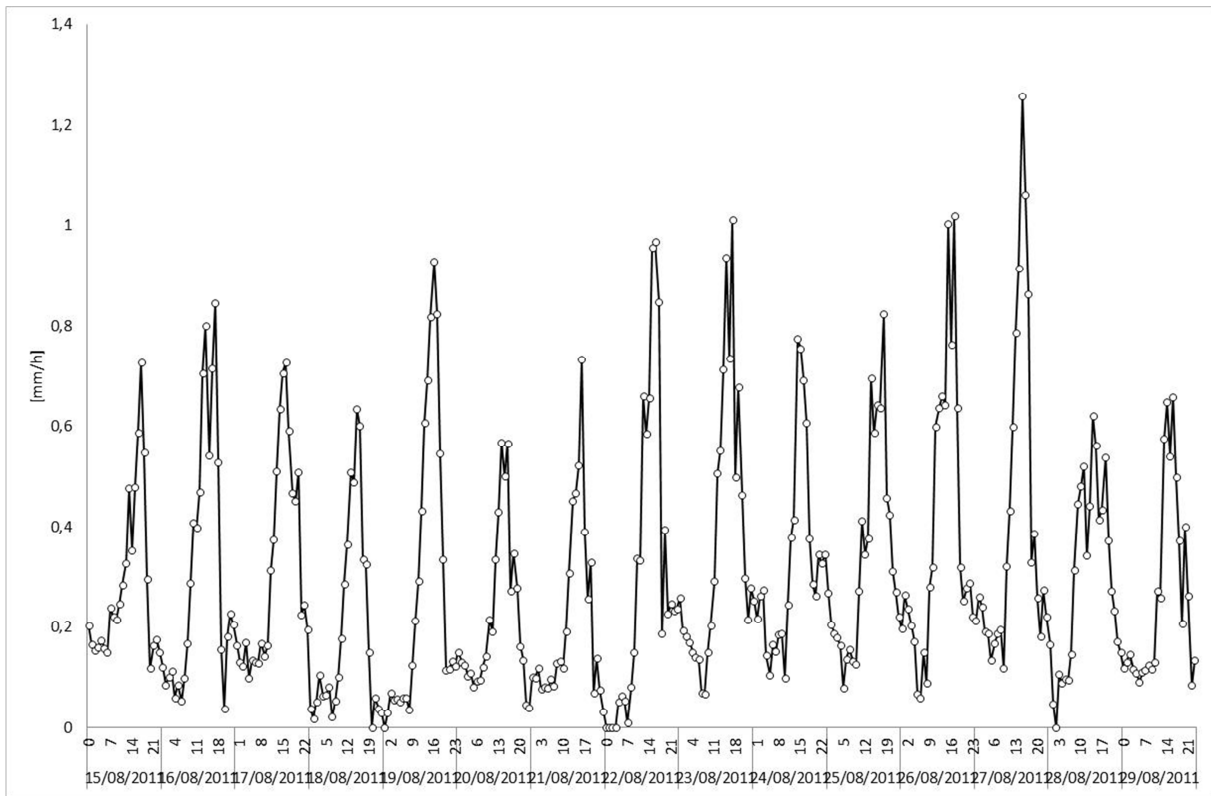


Figura 12 – Indice di evapotraspirazione con andamento orario

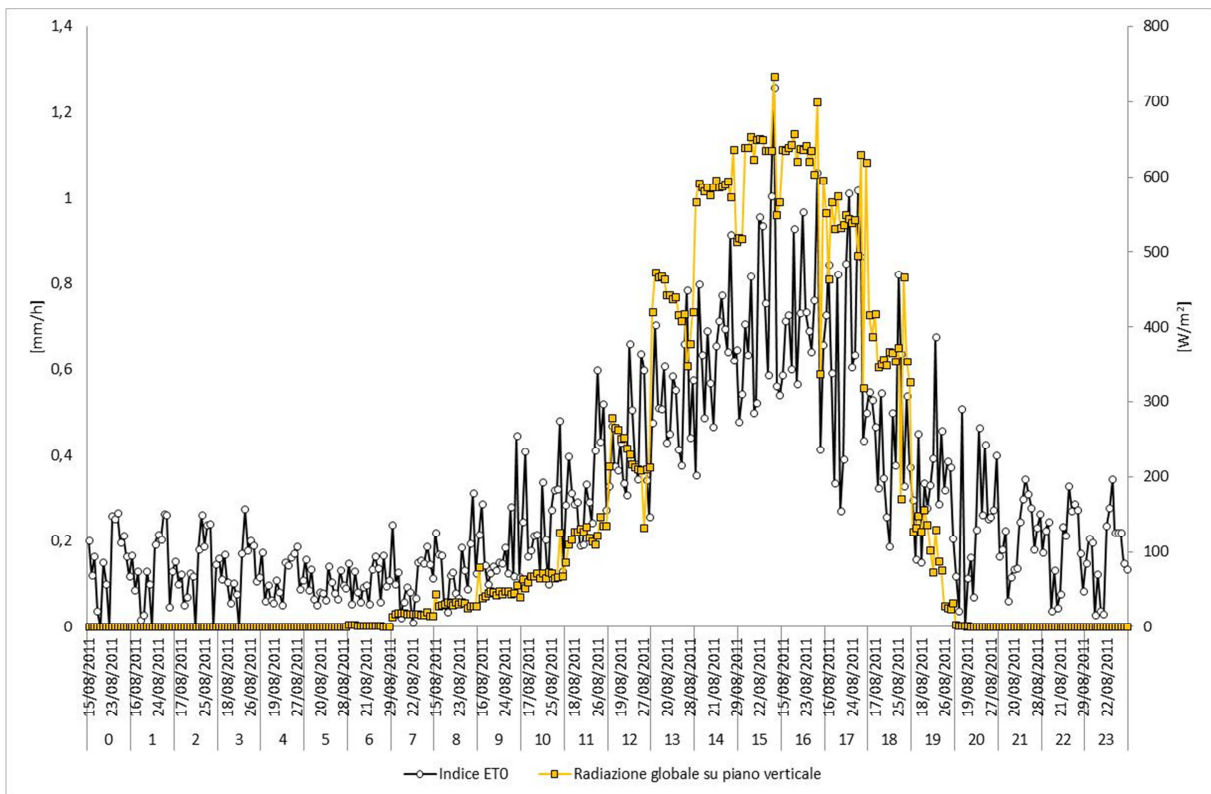


Figura 13 - Indice di evapotraspirazione per le varie ore del giorno in relazione all'andamento della radiazione solare

Il valore medio, durante il periodo indicato, è di 0,25 mm/h ed interessante è l'analisi del grafico in Figura 13 che mostra come l'indice tenda ad alzarsi molto durante le ore pomeridiane, dalle ore 12:00 alle ore 19:00

circa, fino a raggiungere anche valori prossimi a 1 mm/h - 1,2 mm/h. E' evidente la correlazione con la radiazione solare diretta che colpisce la parete esposta a Sud Ovest a partire dalle ore pomeridiane. Tale apporto fornisce l'energia necessaria per innescare, in maniera consistente, i fenomeni evapotraspirativi come espresso chiaramente dalla relazione (11).

3.3.2. INDICE EVAPOTRASPIRATIVO ET_c

La fase successiva consiste nel calcolo del coefficiente ET in condizioni standard, ossia il caso in cui la coltura cresca in spazi aperti e in buone situazioni di irrigazione. In tali condizioni l'indice viene definito ET_c . Tale indice differisce dall'indice di riferimento ET_0 poiché il livello di copertura del terreno, le proprietà intra fogliari e la resistenza aerodinamica della coltura sono evidentemente differenti da quelle del prato di riferimento. Queste proprietà sono integrate nel coefficiente di coltura K_c . L'evapotraspirazione per quella specifica coltura sarà quindi calcolata moltiplicando il coefficiente K_c per l'indice di riferimento ET_0 . Sarebbe possibile, in verità, trovare il tasso di evapotraspirazione direttamente utilizzando l'equazione di Penman-Monteith utilizzando i coefficienti di albedo e i valori di resistenza intra fogliare e aerodinamica, tuttavia questi parametri possono variare continuamente durante la stagione in funzione di molteplici parametri, quindi si è scelto di mantenere il metodo standard proposto dalla FAO che utilizza l'equazione (11) per il calcolo del valore di evapotraspirazione di riferimento, metodo indicato nella guida come *metodo del coefficiente di coltura*.

ET_0 rappresenta, come sopra ricordato, un indice climatico, della potenziale possibilità per l'aria umida di ricevere ulteriore vapore all'interno della sua miscela, mentre l'indice K_c , specifico per ogni coltura, svincola la coltura dal clima della località di crescita e può essere applicato a qualsiasi indice ET_0 di riferimento, nel quale invece, il clima è considerato.

Le quattro principali caratteristiche che possono distinguere la coltura oggetto di analisi dal prato di riferimento sono:

- altezza del raccolto
- coefficiente di riflessione
- resistenza intra fogliare
- evaporazione dal suolo esposto

L'indice ET_c calcolato attraverso il valore K_c rappresenta condizioni in cui non sono presenti limitazioni alla crescita della coltura o all'evaporazione dovute a mancanza d'acqua, densità eccessiva o altro.

Tra i principali parametri che influenzano l'indice K_c possiamo considerare sicuramente l'altezza e la distanza tra le piante. Piante alte portano ad indici più alti. Da un punto di vista climatico, climi secchi e ventosi portano a valori di K_c elevati, viceversa a climi umidi e poco ventosi corrispondono indici più bassi.

In questa sede si è optato per l'approccio con singolo coefficiente di coltura indicato dalla guida FAO (cfr. Capitolo 7), che comprende in un unico valore sia la parte *traspirativa* legata alle piante che la parte *evaporativa* legata al substrato. Non sono inoltre stati considerati gli stadi di crescita delle piante come

specificato nella guida, poiché spesso le piante nel giardino verticale vengono piantate già ad uno stadio avanzato di crescita. Si è quindi optato per la scelta di un coefficiente K_c medio.

Per il calcolo del coefficiente K_c è stato necessario individuare, in collaborazione con i tecnici della ditta installatrice di uno dei prototipi considerati nel presente lavoro, una corrispondenza tra le specie indicate dalla guida FAO sull'evapotraspirazione (essendo tali specie prevalentemente di tipo agricolo) e le specie utilizzate per la creazione del giardino verticale. Tale corrispondenza e il relativo coefficiente dedotto dalle tabelle FAO è riportato in Tabella 2:

Tabella 2 - Corrispondenza specie

SPECIE GIARDINO VERTICALE	SPECIE CORRISPONDENTE FAO	TIPO CORRISPONDENZA	COEFFICIENTE K_C	AREA OCCUPATA [%]
Geranium sanguineum	Strawberries	Similarità della foglia	0,7	7
Geranium Johnson's blue	Strawberries	Similarità della foglia	0,7	7
Anemone sp.	Strawberries	Similarità della foglia	0,7	5
Alchemilla mollis	Strawberries	Similarità della foglia	0,7	5
Heuchera micrantha Palace Purple	Strawberries	Similarità della foglia	0,7	8
Vinca minor	Strawberries	Similarità della foglia	0,7	5
Parthenocissus tricuspidata	Hops		0,8	7
Hedera helix	Hops	Similarità della foglia	0,8	7
Juniperus communis	Conifer trees		0,95	15
Rosmarinus officinalis	Asparagus	Similarità della foglia	0,9	3
Salvia nemorosa	Mint		1,05	3
Teucrium chamaedrys	Mint		1,05	3
Symphoricarpos albus	Berries	Similarità della foglia	1	1
Genista lydia	Clover hay		1,05	1
Bergenia cordifolia	Lettuce	Similarità della foglia	0,9	6
Fatsia japonica	Ricinus Castrobean	Similarità della foglia	0,45	3
Carex brunnea	Cattails Bulrushes		0,6	3

Zoysia	Grazing Pasture		0,8	3
Koeleria	Grazing Pasture		0,8	3
Stipa pennata	Grazing Pasture		0,8	5

Successivamente si è stabilito un coefficiente unico K_c calcolato sulla base delle informazioni in tabella e pesato sull'area occupata da ciascuna specie.

Alla fine dell'analisi sul fenomeno dell' evapotraspirazione si sono potuti stimare i due coefficienti K_c per i due *Living Walls* monitorati. Nella fattispecie i risultati ottenuti sono stati:

- LW-GaOp: 0,81
- LW-GrCl: 0,8

Il caso LW-GrCl il calcolo del coefficiente K_c è stato più semplice grazie alla presenza di sola erba.

In conclusione si riporta a titolo di esempio la stima della quantità d'acqua evaporata giornalmente dal prato verticale LW-GaOp in condizioni di irrigazione standard. L'andamento del coefficiente ET_c è riportato in Figura 14.

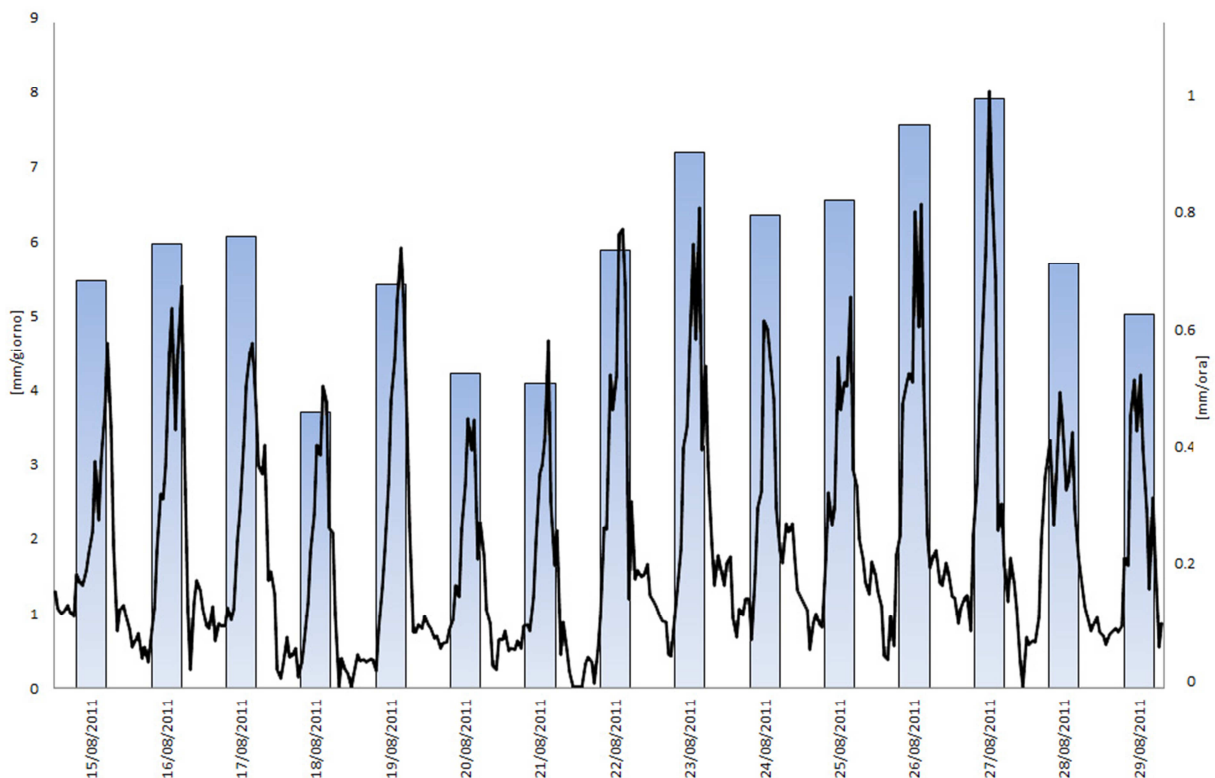


Figura 14 – Andamento indice di evapotraspirazione. Giornaliero (istogrammi) ed orario (linea continua).

L'andamento orario segue la radiazione solare con picchi sempre espressi nel tardo pomeriggio. Il valore medio dell'indice giornaliero è di circa 2 mm/giorno di acqua evaporata, circa 20 litri. Una interessante considerazione è la comparazione con l'energia in arrivo dalla radiazione solare e quella utilizzata per

l'evapotraspirazione. Se consideriamo che in una giornata media estiva, nel primo pomeriggio, la radiazione solare in arrivo su una superficie verticale esposta a Sud o Ovest può arrivare anche a 700 W/m² possiamo ipotizzare di paragonarla alla potenza specifica di evapotraspirazione. In particolare il tasso di evapotraspirazione in un'ora soleggiata può arrivare a circa 0.15 mm/h, che corrispondono a circa 1.3 litri di acqua evaporata. A questo punto considerando il calore latente di evaporazione dell'acqua pari a 2450 kJ/kg possiamo calcolare una potenza specifica di circa 100 W/m². Quindi circa il 15% della radiazione incidente contribuisce all'evapotraspirazione. Un valore relativamente piccolo che tuttavia è utile non trascurare soprattutto nella valutazione delle temperature superficiali interne.

3.4. LEAF AREA INDEX

Un altro importante parametro che caratterizza i *Living Walls* e considerato nell'analisi fisica e nella modellazione numerica è il *Leaf Area Index* (LAI). Questo parametro rappresenta, come accennato in precedenza, il rapporto tra l'area delle foglie e l'area del terreno sottostante (**Barrio 1998**). Utilizzando i dati raccolti da Cheng (**Cheng et al. 2010**) è stato possibile stimare un valore di LAI per entrambe le tipologie di rivestimento vegetale monitorate. In particolare si è stimato un valore di LAI come segue:

- LW-GaOp: 3
- LW-GrCl: 5.8

In questo modo la trasmissione solare τ_s e la riflessione solare ρ_s del layer corrispondente alle piante possono essere espresse in funzione del LAI, in accordo con le seguenti equazioni (**Barrio 1998**):

$$\tau_{sw} = \exp(-k_{sw} \cdot LAI) \quad (17)$$

$$r_{sw} = (1 - \tau_{sw} \cdot LAI) \cdot r_{\infty} \quad (18)$$

In cui la riflessione del canopy r_{∞} è pari a 0.12 e il coefficiente di estinzione k_{sw} è pari a 0.74.

4. MONITORAGGIO MICROCLIMATICO DI DUE LIVING WALLS

Durante il periodo di ricerca è stato possibile effettuare il monitoraggio dei due tipi di *Living Walls* descritti in maniera dettagliata ai capitoli 2 e 3:

- Living wall coltivato a giardino verticale con intercapedine ventilata (LW-GaOp)
- Living wall coltivato a prato verticale con intercapedine chiusa (LW-GrCl)

In questo capitolo verranno descritte le tecniche utilizzate per il monitoraggio sul campo e i risultati ottenuti dalle misure. In generale, per entrambe le tipologie monitorate, è stato possibile caratterizzare il comportamento termofisico della struttura durante le due stagioni più significative: estate ed inverno.

4.1. LIVING WALL A GIARDINO VERTICALE CON INTERCAPEDINE VENTILATA (LW-GaOp)

Presso la sede della ditta Sundar Italia a Lonigo (VI) è stato effettuato tra l'estate 2011 e l'inverno 2012 un monitoraggio microclimatico di un *Living Wall* coltivato a giardino verticale e dotato di una intercapedine aperta tra la struttura del rivestimento vegetale e la parete esterna dell'edificio. Il rilievo è iniziato nella prima settimana di Luglio 2011 per terminare nella prima metà di Gennaio 2012, tale periodo ha consentito di raccogliere i dati necessari per la caratterizzazione del comportamento termofisico del Living Wall in condizioni estive ed invernali.

Lo schema dettagliato della struttura proposta dalla ditta Sundar Italia è visibile in Figura 15. Si tratta di una struttura con telaio in alluminio a cui è fissato un pannello in Forex (Polivinilcloruro) su cui sono installati tre feltri con funzioni differenti. Il primo feltro, aderente al pannello di sostegno in Forex, ha la funzione di consentire all'acqua di scorrere tra il pannello in PVC e il feltro stesso; il secondo feltro ha la funzione di permettere la propagazione delle radici delle specie piantumate infine il terzo feltro ha una funzione prevalentemente meccanica di sostegno durante l'attività di radicamento delle piante, per poi divenire un'unica struttura compatta con le radici, al termine del radicamento e per il resto della vita del pannello. Il telaio in alluminio è agganciato ad una serie di montanti e staffe fissati, tramite tasselli, direttamente sulla superficie esterna del paramento murario. Sulla sommità dell'intera struttura è posizionato un tubo flessibile per l'irrigazione. Tale sistema, la cui portata di irrigazione è funzione di molteplici fattori tra cui l'esposizione e il tipo di piante, è in grado di fornire in media attraverso ogni ugello 2,1 l/h di acqua al giardino verticale, gli ugelli sono disposti ogni 15 cm lungo il tubo stesso. In alcuni casi l'acqua in eccesso viene raccolta da una vasca posizionata sul pavimento, all'estremità inferiore del rivestimento vegetale. I tecnici della ditta tuttavia, stimano che la percentuale d'acqua non raccolta dal feltro durante il periodo estivo non superi il 5% - 10 %, il resto viene assorbito dalle piante o convertito in vapore attraverso il fenomeno dell'evapotraspirazione.

Le principali specie vegetali accolte dal triplo strato di feltro sono elencate di seguito: *Sedum spurium*, *Geranium sanguineum*, *Geranium Johnson's blue*, *Anemone sp.*, *Viva minor*, *Parthenocissus tricuspidata*, *Heuchera micrantha Palace Purple*, *Salvia nemorosa*, *Lonicera pileata*, *Pittosporum tobira*, *Juniperus*

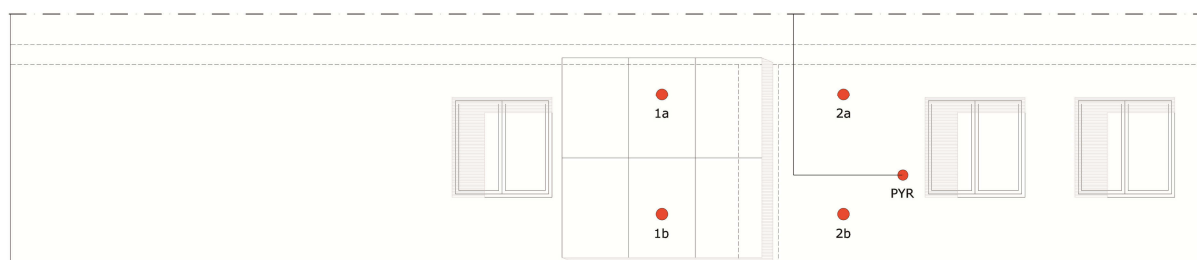


Figura 16 - Prospetto SudOvest

In Tabella 3 vengono descritte le tipologie di sonde utilizzate per il monitoraggio e le loro principali caratteristiche tecniche.

Tabella 3 – Riepilogo sonde utilizzate per il monitoraggio

VARIABILE MONITORATA	TIPO DI SONDA	ACCURATEZZA
Temperatura superficiale	PT 100	0,2 °C
Temperatura aria interna	Tinytag ultra 2 – termistore	0,4 °C a 20°C
Umidità aria interna	Tinytag ultra 2 – capacitivo	+/- 3% a 25°C
Flusso di calore	Hukseflux	
Temperatura aria esterna	Hobo prov2	+/- 0,18°C a 25°C
Umidità aria esterna	Hobo prov2	+/- 2,5 da 10% a 90%
Velocità aria	Accusense t-dci-F900	+/- 0,05 m/s
Radiazione solare	Kipp&Zonen CM6B	9-15 $\mu\text{v}/\text{wm}^{-2}$

Il posizionamento delle sonde è avvenuto per fasi come mostrato nelle immagini dalla Figura 17 alla Figura 22. Inizialmente si sono posizionate le termoresistenze PT100 in corrispondenza del paramento murario esterno, dopo aver opportunamente raschiato la superficie esterna con apposita spatola, per evitare futuri e scomodi distaccamenti della sonda stessa. In Figura 17 e in Figura 18 sono mostrate le applicazioni delle sonde sul retro del pannello in polivinilcloruro e sulla parete e l'assetto finale del campo di misura. Successivamente sono state montate anche le sonde per il rilevamento di temperatura e umidità esterna, sempre in corrispondenza dei precedenti punti di rilievo, come mostrato in Figura 19 e Figura 20. Un'ultima sessione ha permesso di installare i sensori per la velocità dell'aria nell'intercapedine che la struttura forma con la parete esterna, e i sensori per il flusso di calore sulla superficie esterna della parete, sia in corrispondenza della porzione coperta da verde che in quella nuda (porzione di parete senza la struttura di Living Wall) come mostrato in Figura 21 e Figura 22. In Figura 23 è rappresentata la sezione finale in corrispondenza della parete vegetale e il posizionamento delle relative sonde. Come è possibile notare si è scelto di monitorare il profilo delle temperature su due punti, a diverse altezze, su ciascuna porzione di parete in modo da poter analizzare un eventuale diversità di comportamento dovuto alla differenza di altezza.

Uno dei primi obiettivi del monitoraggio sarà quello di indagare ed eventualmente evidenziare la dipendenza delle principali variabili monitorate, dalle principali forzanti climatiche sole, vento e pioggia. Tutti i grafici sono riportati per un intorno temporale dei giorni in cui sono massime le forzanti climatiche considerate. Questo procedimento è stato adottato per meglio comprendere l'andamento delle variabili prima e dopo la forte sollecitazione. Nel caso in cui le variabili monitorate evidenzino dipendenza dai parametri ipotizzati, si riporterà il profilo delle variabili nell'intera sezione della parete nell'istante temporale di maggior dipendenza.



Figura 17 – Sonde sul retro del pannello



Figura 18 – Disposizione finale



Figura 19 - Dettaglio protezione solare su sonde esterne



Figura 20 - Assetto finale test di prova



Figura 21 - Dettaglio posizionamento sonda anemometrica

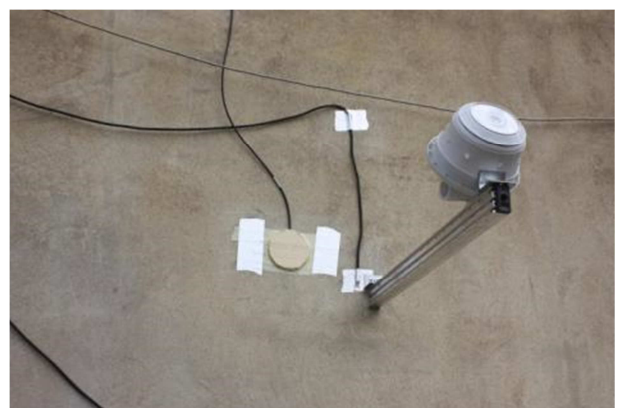


Figura 22 - Dettaglio posizionamento termoflussimetro

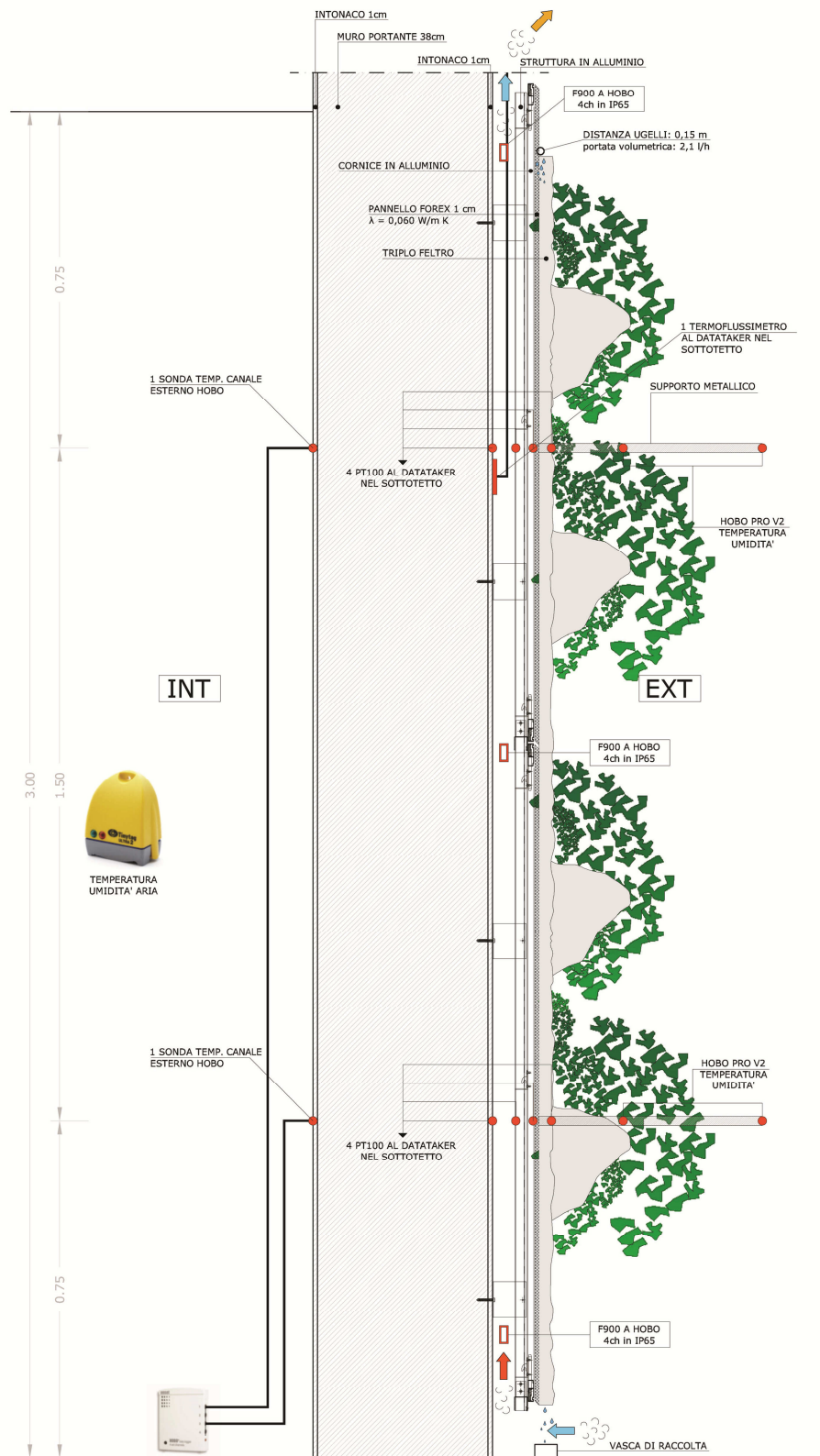


Figura 23 - Sezione parete verde con posizionamento sonde

4.1.1. RISULTATI PERIODO ESTIVO LW-GaOp

La campagna di monitoraggio estiva è iniziata il giorno 6 Luglio 2011 e la prima fase si è conclusa al termine della stagione estiva il 21 Settembre 2011. All'interno del periodo di raccolta dati è stato necessario individuare giornate in cui le forzanti climatiche fossero ben definite. In tal modo è possibile, come già discusso nella sezione precedente, collegare eventualmente il comportamento della struttura analizzata con la sollecitazione esterna. Sono stati individuati i seguenti giorni:

- Giorno con irraggiamento solare massimo
20 Settembre 2011: 4338 Wh/giorno (radiazione complessiva nel giorno considerato)
- Giorno con irraggiamento solare minimo
18 Settembre 2011: 732 Wh/giorno (radiazione complessiva nel giorno considerato)
- Giorno con ventosità massima
15 Agosto 2011: 2,75 m/s (velocità media del vento durante il giorno considerato)
- Giorno con ventosità minima
18 Agosto 2011: 0,82 m/s (velocità media del vento durante il giorno considerato)
- Giorno con piovosità massima
16 Agosto 2011: 446,8 mm (precipitazione totale durante il giorno considerato)
- Giorno con piovosità minima
17 Agosto 2011: 16 mm (precipitazione totale durante il giorno considerato)

La prima coppia di date riguarda i giorni in cui la forzante considerata è la radiazione solare ed essendo praticamente contigui, verranno analizzati contemporaneamente per studiare la continuità degli andamenti. La radiazione considerata rappresenta la quantità totale di radiazione solare globale incidente sul piano verticale durante tutta la giornata, misurata dal piranometro posizionato sulla parete oggetto di studio. La radiazione solare è minima il giorno 18 Settembre in corrispondenza con l'inizio di un fenomeno piovoso. Il giorno successivo la piovosità aumenta notevolmente, tuttavia la radiazione solare è comunque maggiore del giorno precedente. Il giorno 20 Settembre, infine, il fenomeno temporalesco è terminato e la radiazione è massima in un giorno sereno. Per le due coppie successive di analisi delle forzanti vento e precipitazione viene considerato un unico periodo dal 15 Agosto al 19 Agosto. L'andamento delle variabili microclimatiche nei giorni considerati viene riproposto in Figura 24

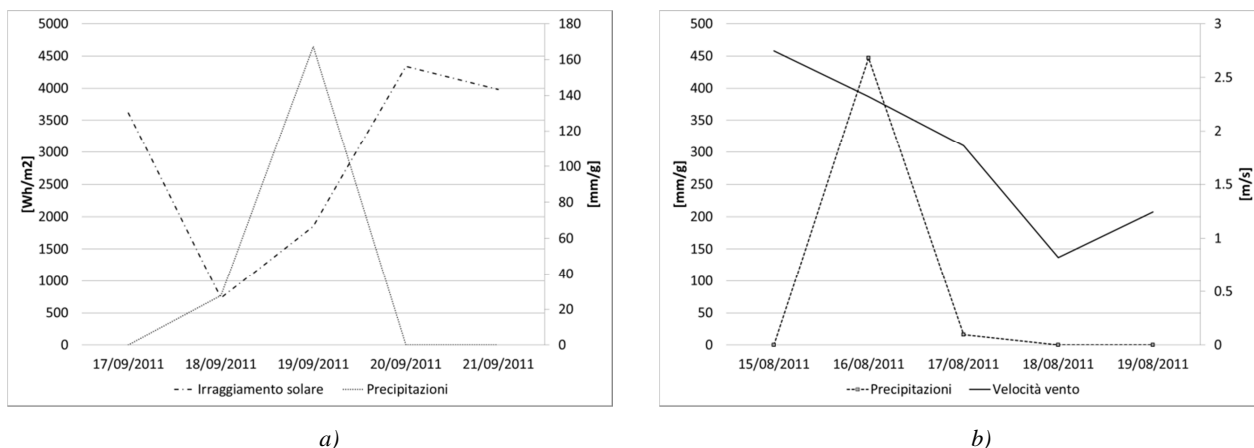


Figura 24 – Andamento variabili microclimatiche nei giorni scelti per l'analisi termofisica. a) radiazione solare e precipitazioni; b) precipitazioni e ventosità

Dopo aver individuato i giorni climaticamente più significativi si può procedere all'analisi dei dati rilevati. In Figura 25 sono riportate le differenze di temperatura tra i punti 1a-1b e 2a-2b in funzione delle forzanti climatiche sole e vento. E' possibile notare come la differenza di temperatura tra il punto 1a e il punto 1b, riportata come ΔT , sulla superficie esterna retrostante al rivestimento verde, oscilla tra gli $0,5^\circ\text{C}$ ed i 2°C circa. In particolare è evidente la dipendenza della differenza di temperatura dalla radiazione solare. In giorni in cui l'apporto di radiazione solare è elevato la differenza tra i due punti è nell'ordine di $1,5^\circ\text{C} - 2^\circ\text{C}$; nei giorni in cui l'apporto di radiazione solare è minimo la differenza si riduce a $0,5^\circ\text{C} - 0,8^\circ\text{C}$. Opposto è invece il comportamento delle omologhe sonde sulla parete nuda: punti 2a e 2b, riportati anche in questo caso come differenza di temperatura, il cui valore oscilla tra $-1,5^\circ\text{C}$ e $2,5^\circ\text{C}$. Durante le ore con maggiore radiazione è questa volta la sonda più bassa ad avere valori di temperatura più elevati. I picchi di temperatura riscontrabili ad inizio giornata sono dovuti ad una questione geometrica legata al differente momento in cui la radiazione solare colpisce i 2 punti analizzati. Il delta negativo registrato per i punti in posizione 2 può essere dovuto all'effetto di riflessione della radiazione solare che colpisce l'antistante marciapiede e surriscalda le termoresistenze più vicine. Questo fenomeno ricade nella nota e ben più estesa problematica dell'isola di calore già descritto nei capitoli iniziali e in cui le proprietà di assorbimento, riflessione ed emissività, dei materiali edilizi contribuiscono, in condizioni particolari, a surriscaldare l'aria dell'ambito urbano e a portarla a valori più alti rispetto al contesto rurale che la circonda. Il contesto rurale ha inoltre il vantaggio di una maggior ventosità e quindi possibilità di maggiori scambi convettivi tra le pareti degli edifici e l'aria, con il risultato di ridurre le temperature superficiali.

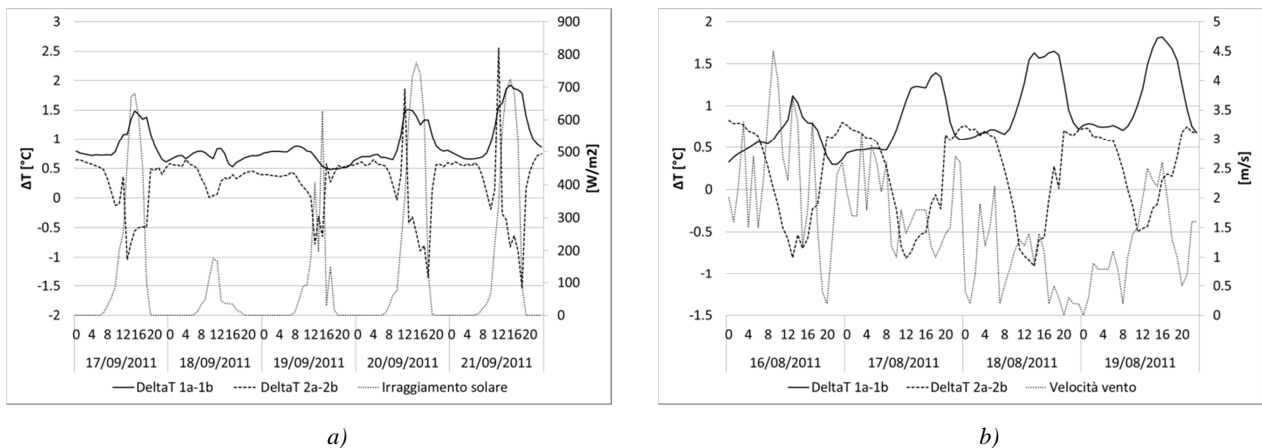


Figura 25 – Andamento differenza di temperatura superficiale punti 1a-1b e 2a-2b. a) Andamento in funzione di radiazione solare; b) Andamento in funzione di velocità del vento.

Non è così evidente invece l'interazione tra la differenza di temperatura tra i punti analizzati e il vento, né nel caso della porzione verde né nel caso della porzione nuda. Sia in condizioni ventose che non ventose le differenze di temperature sono pressoché simili.

Dopo una prima analisi sul rapporto esistente tra le temperature superficiali a diverse altezze e la loro interazione con le variabili microclimatiche, è stata effettuata un'analisi che ha confrontato due punti diversi, 1a e 2a ma a parità di altezza. Di fatto questo confronto è quello che è stato poi utilizzato per tutto il resto dell'analisi, non essendo le differenze tra varie altezze significative.

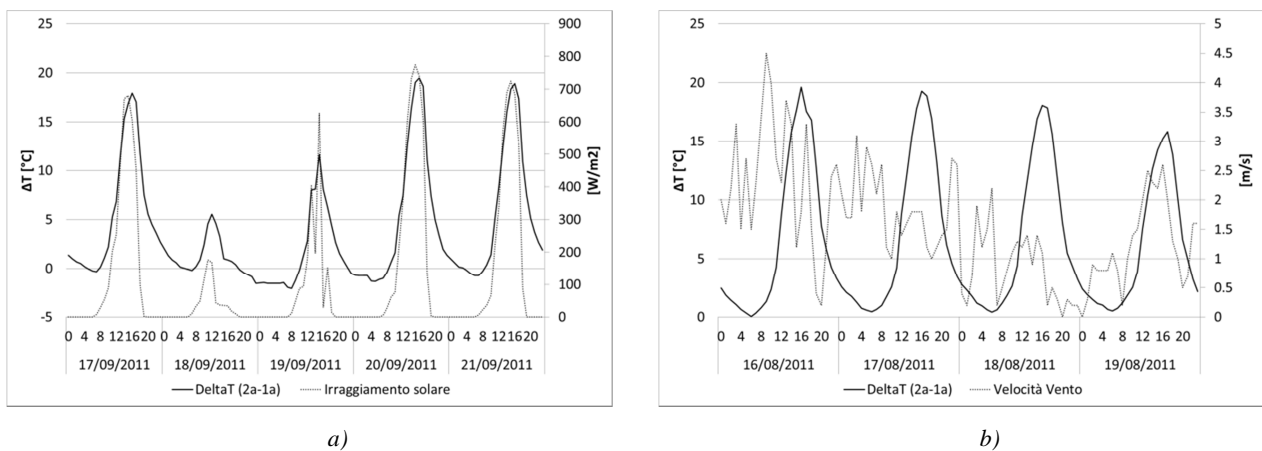


Figura 26 - Andamento differenza di temperatura superficiale punti (2a-1a). a) andamento in funzione di radiazione solare; b) andamento in funzione della velocità del vento.

In Figura 26 è riportato l'andamento delle differenze di temperatura tra il punto 2a, corrispondente al valore di temperatura superficiale esterna della parete nuda, e il punto 1a, corrispondente al valore di temperatura superficiale esterna della parete verde. Un DeltaT positivo indica un valore della sonda in 2a maggiore rispetto all'omologa posizionata in 1a. E' evidente la correlazione con la radiazione solare e in particolar modo la differenza di temperatura raggiunge valori dai 12°C ai 20°C durante giornate soleggiate e valori molto più bassi, intorno ai 5°C, durante giornate meno soleggiate. Anche in questo caso il valore di DeltaT non sembra influenzato dalla forzante vento, essendo praticamente costante il differenziale di temperatura sia in giorni molto ventosi che poco ventosi.

Riassumendo l'analisi sulle temperature superficiali esterne è possibile affermare che la differenza di temperatura tra due sonde nella stessa porzione di parete, ma su due altezze diverse mette in evidenza come dietro la parete verde la temperatura più alta sia quella della sonda in alto (punto 1a); al contrario sulla parete nuda la temperatura maggiore si registra in corrispondenza della sonda più bassa (punto 2b), probabilmente per un problema di riflessione della radiazione solare dovuta alla prossimità con il marciapiede. Entrambi gli andamenti sono chiaramente influenzati dalla radiazione solare, ma non dal vento. Per ciò che riguarda la differenza tra la temperatura superficiale esterna dietro il rivestimento verde (punto 1a) rispetto a quella sulla porzione nuda (punto 2a) è evidente come la radiazione solare sia la forzante climatica con la maggior interazione e tale effetto porta la temperatura della parete nuda ad essere costantemente più alta dell'omologa dietro la porzione verde. Anche in questo caso il vento non ha molta influenza sulle variabili considerate.

4.1.1.1. ANALISI UMIDITA' RELATIVA

Successivamente è stato analizzato l'andamento dell'umidità relativa. Tale parametro è stato monitorato sia tra il fogliame che a 50 cm dalle foglie come visibile in Figura 23. Come per la temperatura, inizialmente verrà condotta una analisi dell'interazione dei valori di umidità relativa tra le foglie del giardino verticale e a 50cm dal giardino in relazione alle forzanti climatiche ritenute più influenti come precipitazioni e vento. Tale studio verrà eseguito per verificare le condizioni di umidità nei pressi del rivestimento vegetale e se in determinate condizioni atmosferiche vi sia o meno una variazione di tale parametro.

In Figura 27 è riportato l'andamento dei valori di umidità relativa per la posizione alta (punto 1a) in tre punti:

- tra le foglie del giardino
- a 50 cm dal rivestimento vegetale
- in condizioni indisturbate nei pressi del rivestimento

La cosa che emerge in maniera chiara è che l'umidità relativa misurata tra le foglie è sempre maggiore rispetto all'umidità relativa misurata a 50 cm dalle foglie che a sua volta rimane quasi sempre, tranne durante le ore centrali del giorno dalle 10:00 circa alle 18:00 circa, più alta rispetto a quella dell'aria esterna misurata in un punto lontano dalla parete verde. I valori raggiunti dall'umidità relativa tra la vegetazione del giardino oscillano tra il 90% durante le ore notturne ed il 40%-50% durante le ore diurne. Valori così alti sono giustificati in parte dal processo di evapotraspirazione ed in parte dalla continua irrigazione del *Living Wall*. Il legame con le precipitazioni non sembra essere di particolare interesse, mentre è evidente il legame con l'andamento della temperatura dell'aria esterna che, come ci aspetterebbe, mostra un aumento dell'umidità relativa al diminuire della temperatura a una diminuzione dell'umidità all'aumentare della temperatura. La differenza tra umidità relativa intra fogliare e umidità dell'aria esterna indisturbata è di circa il 15%-20% durante le ore diurne, mentre l'umidità relativa a 50cm dalle foglie tende ad uniformarsi con i valori dell'aria esterna. Durante la notte quando la temperatura scende e l'umidità relativa tende a salire la differenza rimane intorno al 15% 20% se consideriamo l'aria esterna e l'aria intrappolata tra le foglie del giardino verticale;

differenze di circa il 10% sono registrate per l'umidità relativa tra l'aria intra fogliare e l'aria a 50cm dalle foglie.

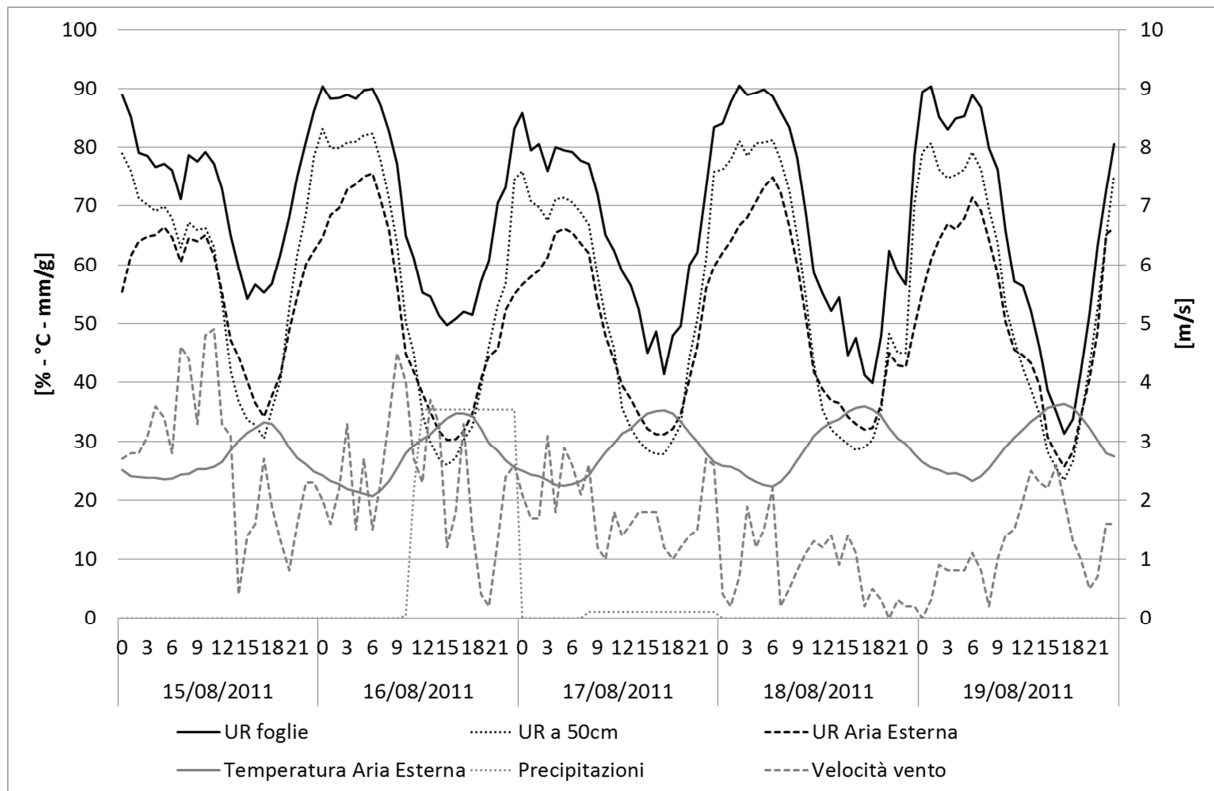


Figura 27 – Andamento umidità relativa e interazione con le principali variabili microclimatiche

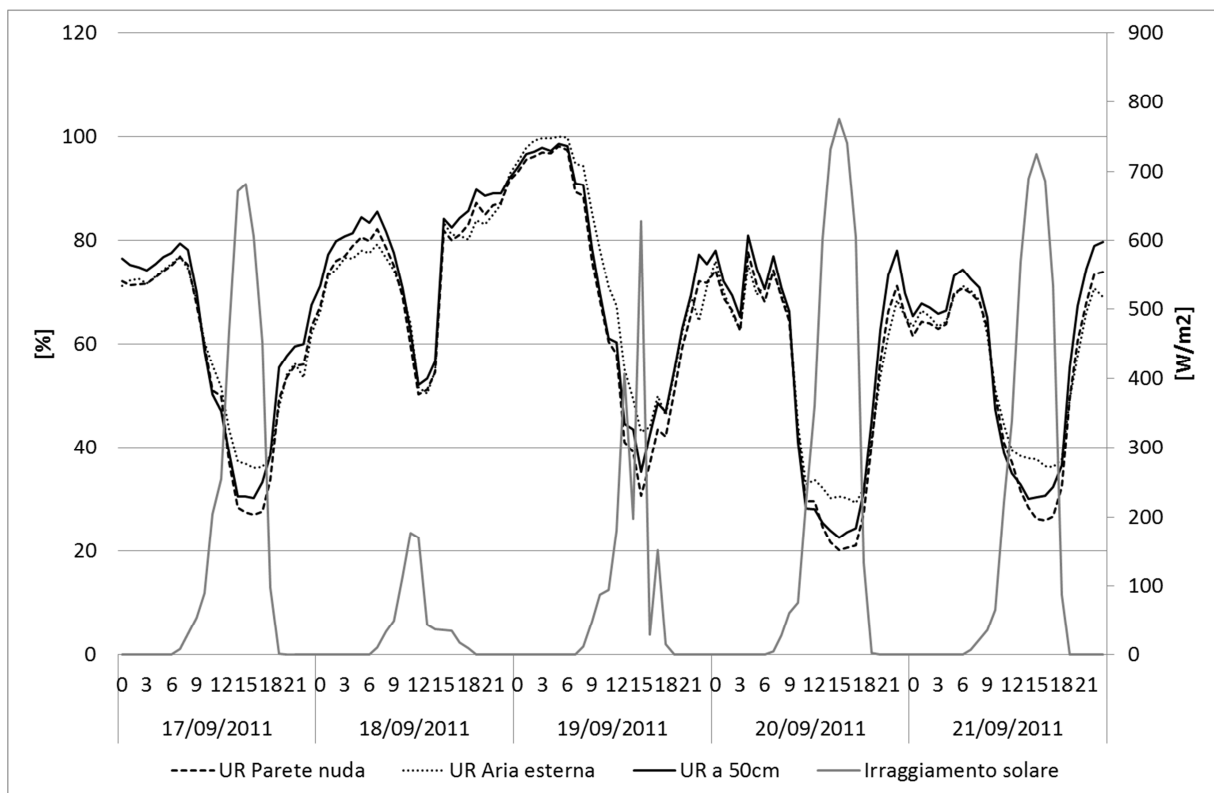


Figura 28 – Confronto umidità relativa tra parete verde e parete nuda

Confrontando le umidità relative tra le sonde della parete nuda e quelle della parete verde, a parità di distanza tra i paramenti superficiali, come indicato in Figura 28, emerge una evidente interazione con la radiazione solare e di conseguenza con la temperatura. Non è stata notata interazione con la piovosità. Le sonde registrano valori di umidità relativa tendenzialmente più alti di circa il 5%, come ci si aspetterebbe, per il punto in corrispondenza della parete verde durante le ore notturne. Durante le ore diurne invece, indifferentemente in giorni più o meno piovosi, il comportamento è uniforme e piccole differenze ricadono del range di accuratezza delle sonde e perciò sono state ritenute poco significative. Durante i periodi a forte radiazione solare il profilo delle umidità relative rimane simile a quello dei periodi piovosi con differenze del 5% - 10%. Durante giornate poco soleggiate (es. 18 Settembre) tutto tende ad uniformarsi non evidenziando particolari differenze tra le umidità registrate sulla parete verde e quelle registrate sulla parete nuda e sull'aria. Questo comportamento può essere dovuto alla carente energia solare incidente sia sulle superfici monitorate che su quelle circostanti e che dovrebbe permettere all'acqua di substrato e stomatale, di evaporare creando le differenze presenti nei giorni soleggiate.

Concludendo, l'analisi del microclima in termini di umidità relativa, nelle immediate vicinanze della parete verde (a circa 50 cm), non subisce variazioni oltre il 10% - 15%, durante le ore notturne rispetto a condizioni indisturbate monitorate a distanza. Durante le ore diurne la differenza si attesta intorno al 5% - 10%. Durante le ore diurne l'umidità relativa dell'aria esterna è più alta rispetto al valore registrato dalla sonda posta a 50cm dal Living Wall, nonostante la forte radiazione incidente sulla parete che dovrebbe incentivare l'evaporazione dell'acqua presente tra le piante. Una possibile spiegazione è che la sonda di misura dell'umidità relativa in condizioni indisturbate e non influenzate dalla presenza della parete verde, sia in una posizione tale da risentire del contesto circostante legato al florovivaismo più della posizione del Living Wall che non è grado di generare flussi di vapore d'acqua confrontabili con quelli dell'intero microclima del vivaio. In ogni caso le differenze sono minime e anche inquadabili nel range di accuratezza delle sonde.

4.1.1.2. ANALISI FLUSSO D'ARIA IN INTERCAPEDINE

L'analisi del flusso dell'aria nell'intercapedine aperta che la struttura del giardino verticale forma con la parete dell'edificio non può prescindere da uno studio sulle temperature interne ed esterne all'intercapedine. Come è possibile vedere nel grafico in Figura 29, l'andamento delle temperature durante un periodo di 6 giorni di condizioni climatiche variabili, in cui si passa da giorni più o meno ventosi (15 Agosto e 18 Agosto) e da giorni più o meno piovosi (16 Agosto e 17 Agosto), è abbastanza regolare. Durante il giorno la temperatura dell'aria esterna è maggiore rispetto a quella dall'aria nell'intercapedine e durante la notte questa situazione regolarmente si inverte, indipendentemente dal clima. Durante il giorno la differenza di temperatura può arrivare fino a 7°C e durante la notte la differenza di temperatura, seppur ridotta arriva a 1°C - 2°C. Tale inversione di temperatura permette una corrispondente inversione del moto d'aria in intercapedine ed è confermata dai dati misurati dai sensori di velocità posti alla base e alla sommità dell'intercapedine. Come è possibile notare infatti ad una inversione di temperatura corrisponde un cambiamento della velocità registrata dai sensori. A questo punto è possibile ipotizzare che il gradiente di pressione, in funzione di densità e altezza,

all'interno dell'intercapedine sia differente da quello che si sviluppa all'esterno dove la temperatura è più alta o più bassa a seconda dell'istante considerato.

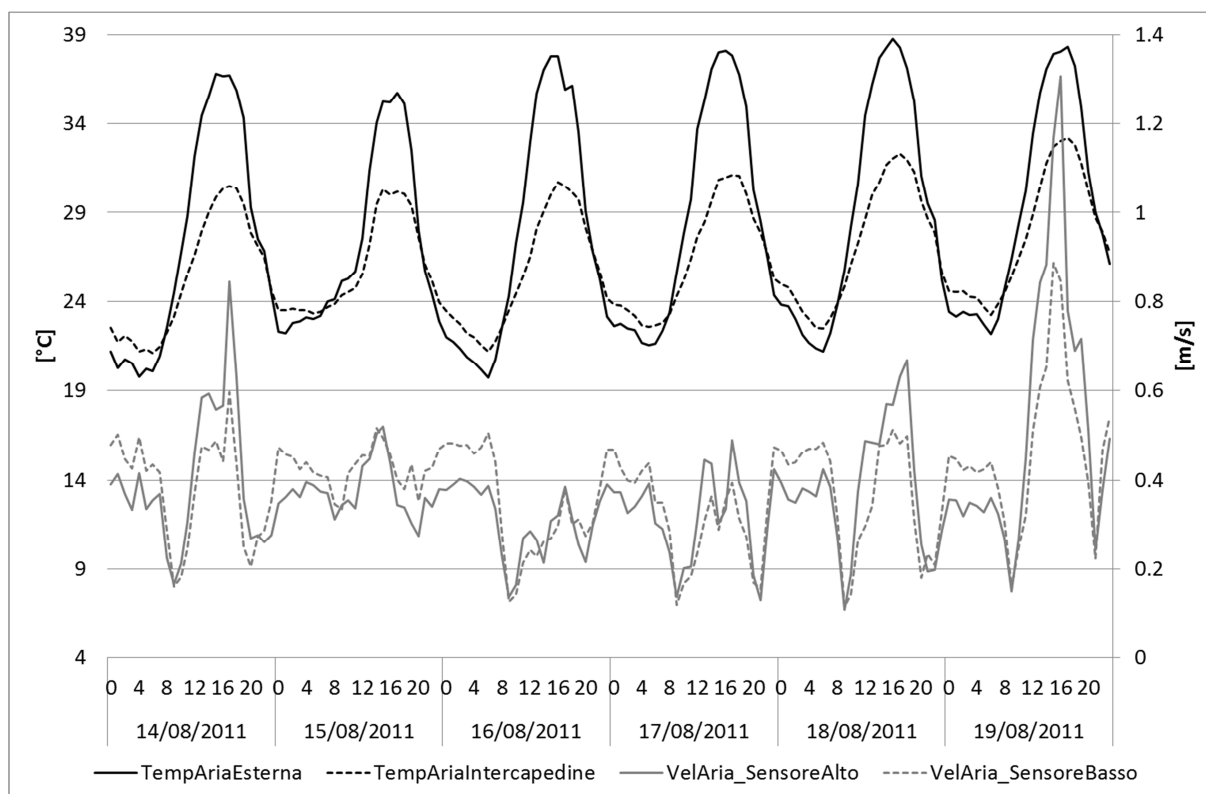


Figura 29 – Andamento velocità dell'aria nell'intercapedine aperta

Sfruttando le note relazioni sui gas ideali è possibile ricavare la densità dell'aria alle varie temperature e di conseguenza evidenziare come aria calda abbia densità minore e gradienti pressori in funzione dell'altezza minori. Al contrario aria fredda abbia densità maggiori e gradienti pressori minori. Si è ritenuta trascurabile la differenza di temperatura tra la sonda in posizione 1a e la sonda in posizione 1b all'interno dell'intercapedine e si è quindi considerata una temperatura media. Qualitativamente il gradiente di pressione che si sviluppa in funzione della differenza di densità con la quota è visibile in Figura 30.

Nelle ore diurne, quindi, mentre la temperatura esterna è maggiore della temperatura dell'aria nell'intercapedine, la densità dell'aria esterna è minore e genererà un gradiente di pressione in funzione dell'altezza che sarà sicuramente inferiore, a parità di altezza, del gradiente generato dalla densità dell'aria all'interno dell'intercapedine. Questa situazione porterà il fluido ad entrare in corrispondenza delle aperture posizionate in alto e ad uscire dalle aperture posizionate in basso (Figura 30, periodo diurno a sinistra). Viceversa, durante le ore notturne, quando l'aria nell'intercapedine rimane ad una temperatura più alta, il gradiente di pressione sarà maggiore nell'intercapedine e quindi il flusso d'aria si invertirà generando un moto ascensionale dal basso verso l'alto (Figura 30, periodo notturno a destra).

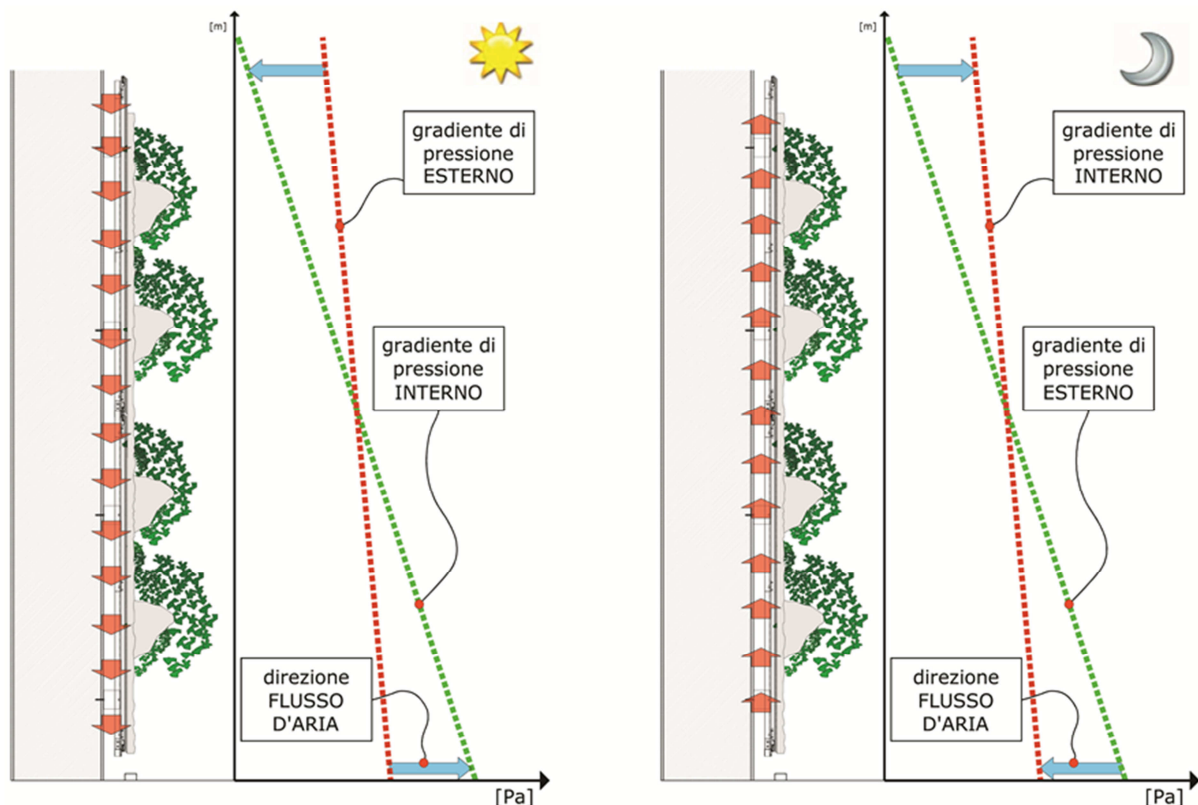


Figura 30 - Studio gradienti di pressione diurni e notturni

Queste ipotesi sono confermate dai dati sperimentali, visibili in Figura 29, in cui, in ore diurne, la velocità del sensore posizionato in alto è maggiore di quella rilevata dal sensore in posizione bassa e viceversa durante il periodo notturno, indipendentemente dalla variabilità del clima. L'aria entrerà nell'intercapedine con velocità maggiore, in alto o in basso, e ne uscirà con velocità inferiore a causa delle perdite di carico dovute all'attrito all'interno del condotto. Questa condizione è verificata praticamente in tutto il periodo riportato, tranne nel giorno 15 Agosto, in cui le condizioni microclimatiche non permettono una valutazione accurata. Le velocità d'aria registrate all'interno dell'intercapedine oscillano tra 0.2 m/s e 0.4 m/s con picchi fino a 1.3 m/s.

Riassumendo, risulta chiaro e coerente il comportamento dell'aria all'interno dell'intercapedine. Dai dati sperimentali emerge che l'aria durante il periodo diurno tende ad entrare dall'apertura presente alla sommità della struttura e ad uscire dall'apertura presente all'estremo inferiore del *Living Wall*. Viceversa durante le ore notturne il flusso si inverte e l'aria entra dal basso ed esce dalla sommità del rivestimento. In ogni caso è presente un moto d'aria con velocità tra 0,2 m/s e 0,4 m/s. Considerando una sezione di circa 0,05 m², la portata volumetrica media dietro ciascuna fila verticale di pannelli può arrivare a 70 m³/h con picchi fino a 180 m³/h.

4.1.1.3. ANALISI FLUSSI DI CALORE

I flussi di calore misurati per la parete verde e per la parete nuda sono stati riportati rispettivamente in Figura 31 e Figura 32. Emerge chiaramente che il flusso di calore misurato dal termoflussimetro posizionato sulla superficie esterna della parete dell'edificio è in stretta relazione con la radiazione solare che colpisce la parete, sia essa nuda o rivestita.

Durante il periodo di monitoraggio, la temperatura interna dei locali retrostanti alla posizione del termoflussimetro è relativamente costante e si mantiene tra i 26°C e i 28°C.

In corrispondenza della parete verde il flusso di calore oscilla tra valori di -18 W/m^2 e 30 W/m^2 mentre per la parete nuda il flusso di calore oscilla tra -90 W/m^2 e 100 W/m^2 circa. Un confronto tra l'andamento dei flussi di calore è riportato in Figura 33a congiuntamente ad un bilancio complessivo in valore assoluto durante il periodo di monitoraggio estivo, riportato in Figura 33b. Il bilancio totale è stato riportato settimanalmente dall'inizio del monitoraggio. E' possibile evidenziare la massiccia riduzione di flussi di calore che attraversano la struttura in corrispondenza della parete verde rispetto a quelli che interessano la parete nuda. Nel dettaglio il totale di energia incidente, durante il periodo di monitoraggio, in corrispondenza della parete nuda è di circa 18000 kWh mentre in corrispondenza della parete verde è di circa 4000 kWh. La riduzione è di circa il 77%.

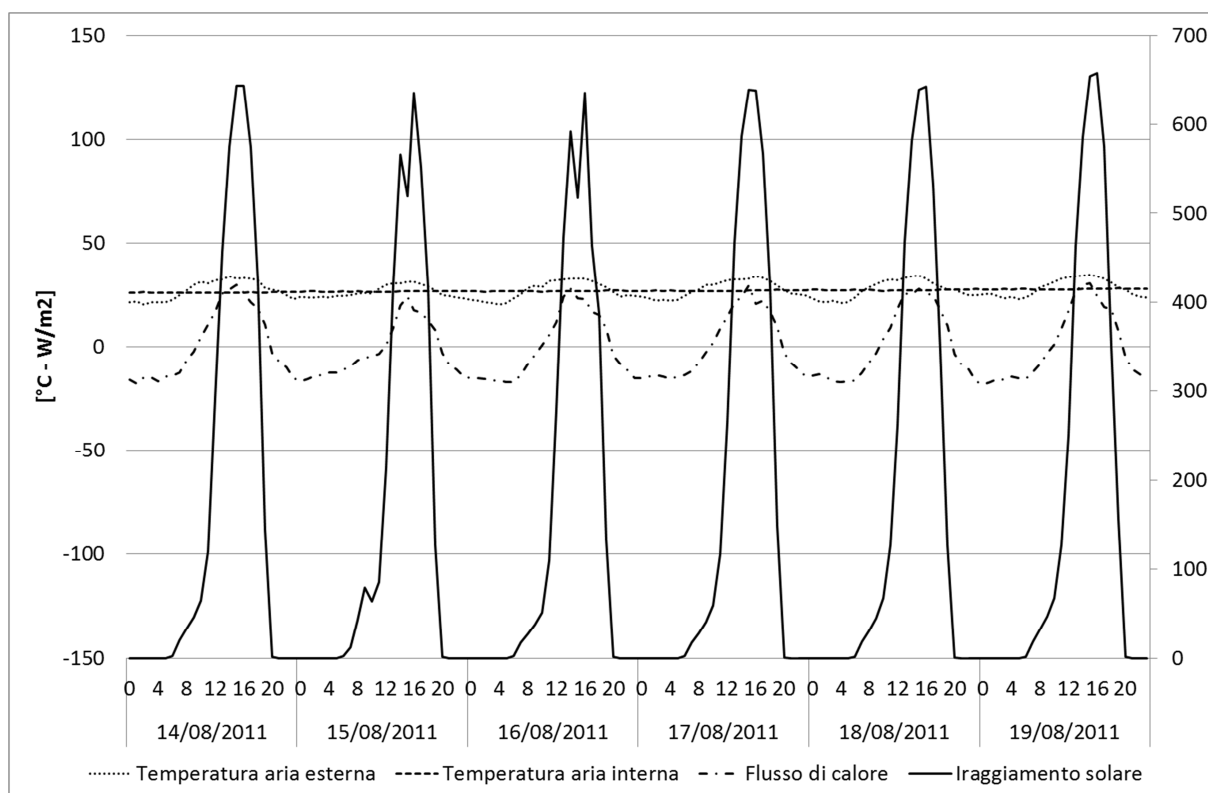


Figura 31 - Flusso di calore misurato su parete verde

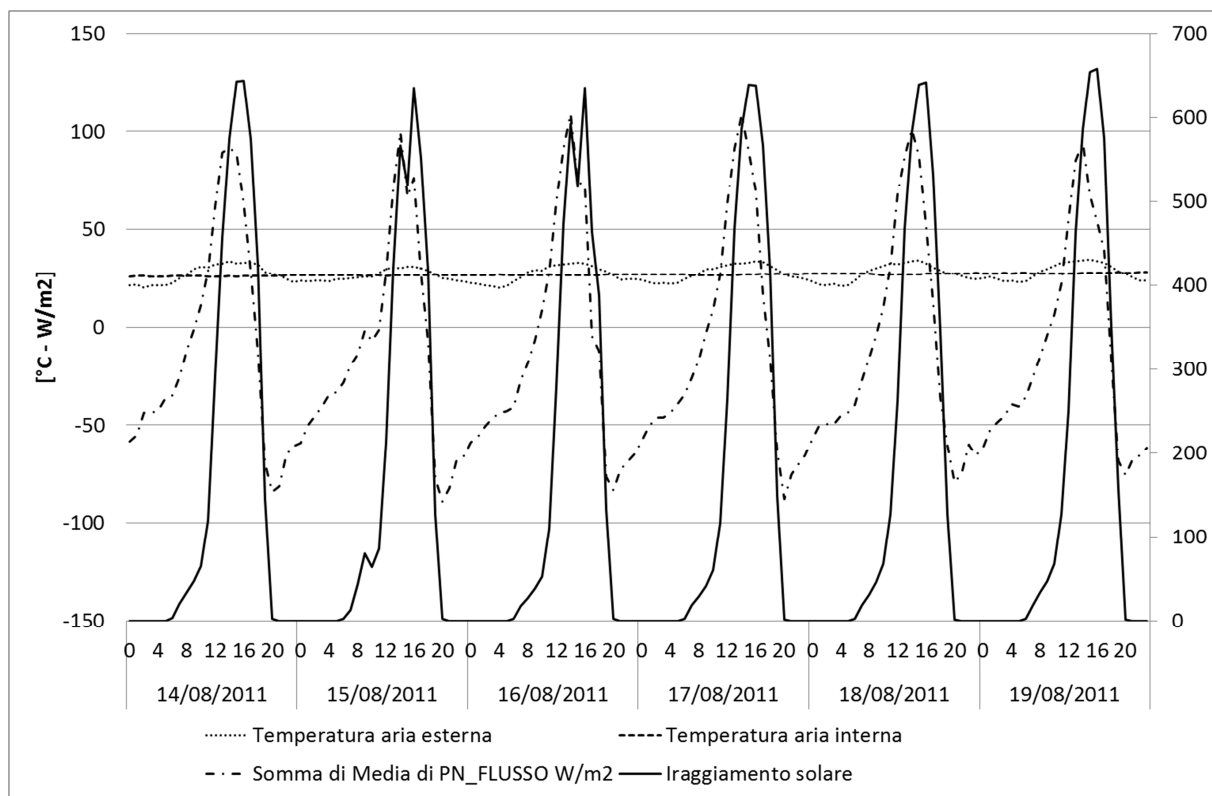
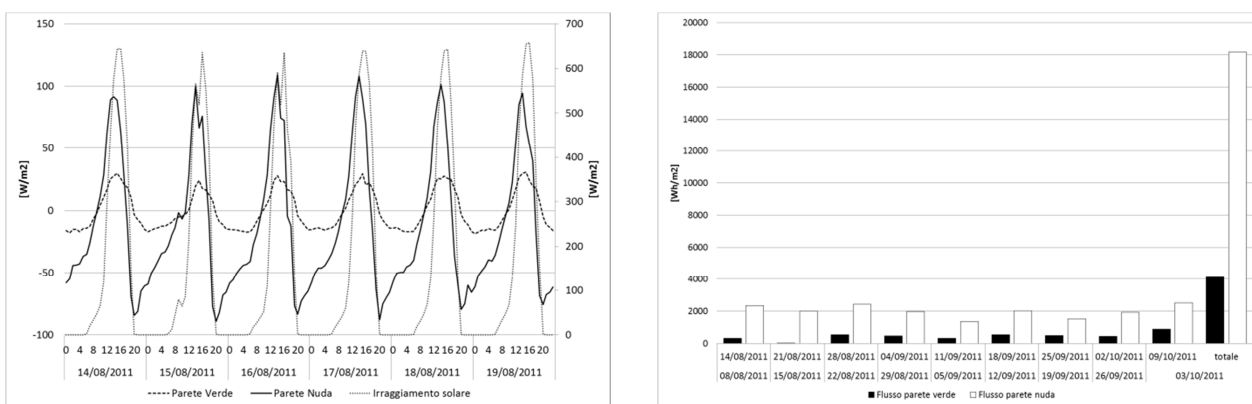


Figura 32 - Flusso di calore misurato su parete nuda



a)

b)

Figura 33 – Riepilogo flussi di calore attraverso parete verde. a) andamento orario; b) bilancio totale estivo

Essendo i termoflussimetri posizionati sulla superficie esterna sono direttamente influenzati dalla significativa quantità di energia che arriva dal sole e hanno quindi un andamento direttamente collegato al flusso di radiazione. Ciò non permette una valutazione dello sfasamento termico, tuttavia si può notare che il picco di energia incidente in corrispondenza della parete verde è leggermente in ritardo rispetto al picco della parete nuda. La differenza è di circa un'ora ed è dovuta all'effetto del rivestimento vegetale.

Concludendo, i flussi di calore risultano in modo evidente dipendenti dall'energia solare incidente sulla parete esposta a SudOvest. La riduzione degli stessi in corrispondenza della parete verde per effetto del *Living Wall* è altrettanto evidente e tale riduzione per il periodo da Agosto a Ottobre è stata di circa il 77%.

Riduzione che evidentemente è dovuta al pesante ed efficace effetto schermante del rivestimento vegetale sulla struttura dell'edificio che impedisce alla radiazione solare di colpire la parete retrostante.

4.1.1.4. ULTERIORE ANALISI DEI PROFILI DI TEMPERATURA

Si riportano di seguito i profili di temperatura della parete verde e nuda nei due giorni più significativi in cui la forzante climatica irraggiamento solare è massima. In Figura 34 sono riportati i profili di temperatura del giorno con intensità di radiazione solare molto elevata, il 20 Settembre, ed è evidente come le temperature superficiali esterne sulla parete nuda risentano della mancanza della protezione offerta dal rivestimento vegetale e siano superiori alle omologhe sulla parete verde fino a 20°C. Interessante è notare come le temperature superficiali interne differiscano, nell'istante riportato, solo di circa 2°C. L'analisi del profilo di temperatura della parete verde mette in evidenza come, lo strato di Forex e feltro su cui sono aggrappate le piante, funga da potente schermatura verso l'esterno, è in questo spazio, infatti, che avviene un brusco calo delle temperature, dell'ordine di 10°C – 12°C. Le temperature calano poi ulteriormente di circa 3°C in corrispondenza dell'intercapedine d'aria per crescere nuovamente di circa 2°C fino al valore dell'aria interna. Diversamente accade per la parte di parete senza rivestimento, ove la riduzione di temperatura avviene in corrispondenza della parete e la differenza di temperatura arriva anche a valori di 17°C.

In Figura 35 sono invece riportati i profili di temperatura di un giorno con intensità di radiazione solare ridotta, il 18 Settembre, e il profilo delle temperature risulta abbastanza lineare con una piccola variazione sempre in corrispondenza del rivestimento vegetale dove le temperature tendono a calare di massimo 2°C in corrispondenza della stratigrafia formata da Forex, feltri e piante.

In ogni caso come è possibile notare dai due diagrammi, nei due giorni più rappresentativi, le temperature dell'aria interna differiscono di qualche decimo di grado, ma sostanzialmente sono uguali e l'effetto schermante sulla parete esterna non risulta così evidente come nel confronto con le temperature superficiali esterne.

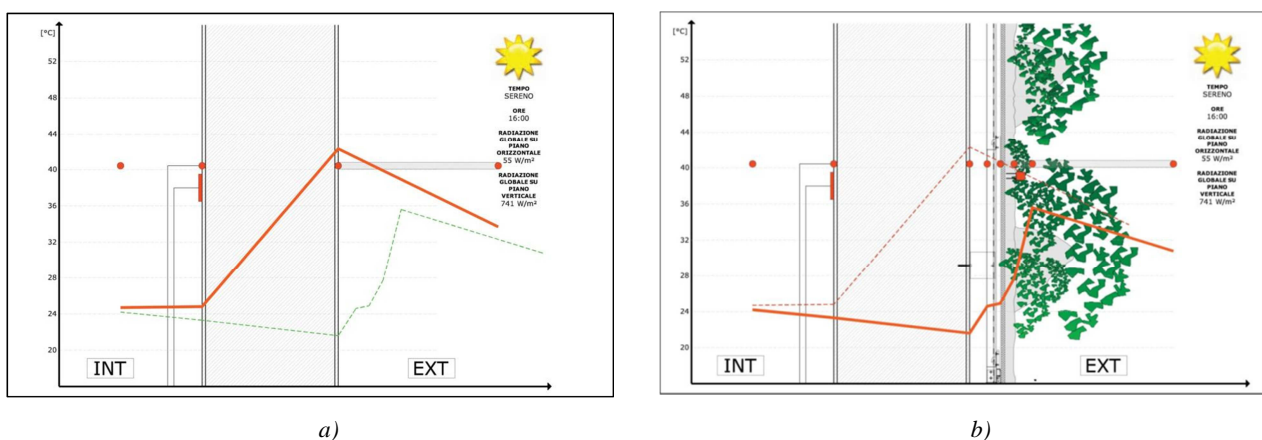
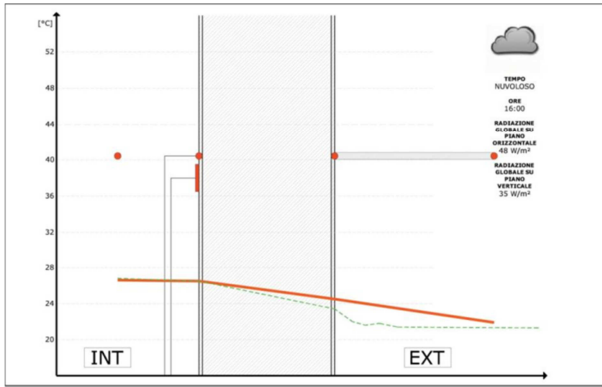
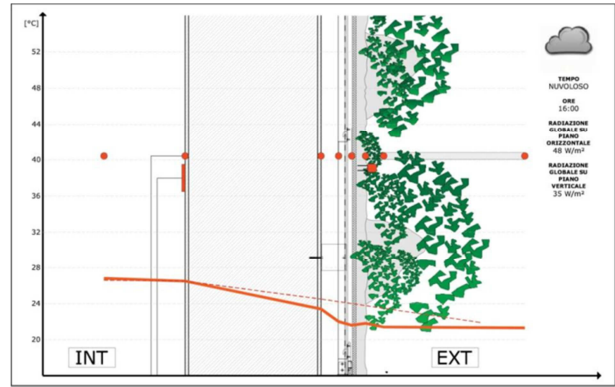


Figura 34 – Profilo temperature giorno soleggiato. La linea tratteggiata indica la parete non rappresentata. a) parete nuda; b) parete verde.



a)



b)

Figura 35 - Profilo temperature giorno nuvoloso. La linea tratteggiata indica la parete non rappresentata. a) parete nuda; b) parete verde.

4.1.2. RISULTATI PERIODO INVERNALE LW-GaOp

La campagna di monitoraggio si è prolungata fino a Gennaio 2012, permettendo così di poter studiare il comportamento della parete verde anche durante il periodo invernale. All'interno del mese di Dicembre sono state individuate, come per il periodo estivo, giornate in cui le forzanti climatiche fossero ben definite. Sono stati scelti i seguenti giorni:

- Giorno con irraggiamento solare massimo
25 Dicembre 2011: 3352 Wh/giorno (radiazione complessiva nel giorno considerato)
- Giorno con irraggiamento solare minimo
14 Dicembre 2011: 66 Wh/giorno (radiazione complessiva nel giorno considerato)
- Giorno con ventosità massima
16 Dicembre 2011: 4 m/s (velocità media del vento durante il giorno considerato)
- Giorno con ventosità minima
04 Dicembre 2011: 0,5 m/s (velocità media del vento durante il giorno considerato)
- Giorno con piovosità massima
03 Dicembre 2011: 88 mm (precipitazione totale durante il giorno considerato)
- Giorno con piovosità minima
02 Dicembre 2011: 3 mm (precipitazione totale durante il giorno considerato)

Individuati i giorni con forzanti climatiche più evidenti si sono verificati gli andamenti delle principali variabili monitorate.

4.1.2.1. ANALISI TEMPERATURE SUPERFICIALI

In Figura 36 è visibile il comportamento delle temperature superficiali in funzione della radiazione solare, in particolare sono state riportate le differenze di temperatura tra i punti di monitoraggio 1a-2a e 1b-2b. Un valore positivo indica che la temperatura è maggiore sulla superficie dietro la parete verde, viceversa, un valore negativo indica che la temperatura più alta è stata registrata sulla parete nuda. Interessante è il comportamento delle temperatura nei giorni meno soleggiati. In tali periodi, infatti, la temperatura superficiale dietro la parete verde resta più alta rispetto a quella della parete nuda evidenziando come la parete verde generi un effetto di protezione per la superficie esterna. Nei giorni di maggior irraggiamento, come ci si poteva aspettare, la forzante solare diventa preponderante e le temperature della superficie nuda superano quelle della superficie verde anche di 20°C. La differenza di comportamento tra le sonde di temperatura poste a 2,25 m e a 0,75 m è poco rilevante salvo durante i giorni di maggior irraggiamento, ove, presumibilmente per gli stessi motivi del periodo estivo, la temperatura della sonda più bassa è maggiore per l'effetto della vicinanza dei marciapiedi. Non sembra evidente, invece, il legame con l'andamento della ventosità e la piovosità, come mostrato in Figura 37. Sia nei giorni più ventosi che meno ventosi le temperature sembrano comunque legate in maniera preponderante all'andamento della radiazione solare. Lo stesso dicasi per i giorni più o meno piovosi.

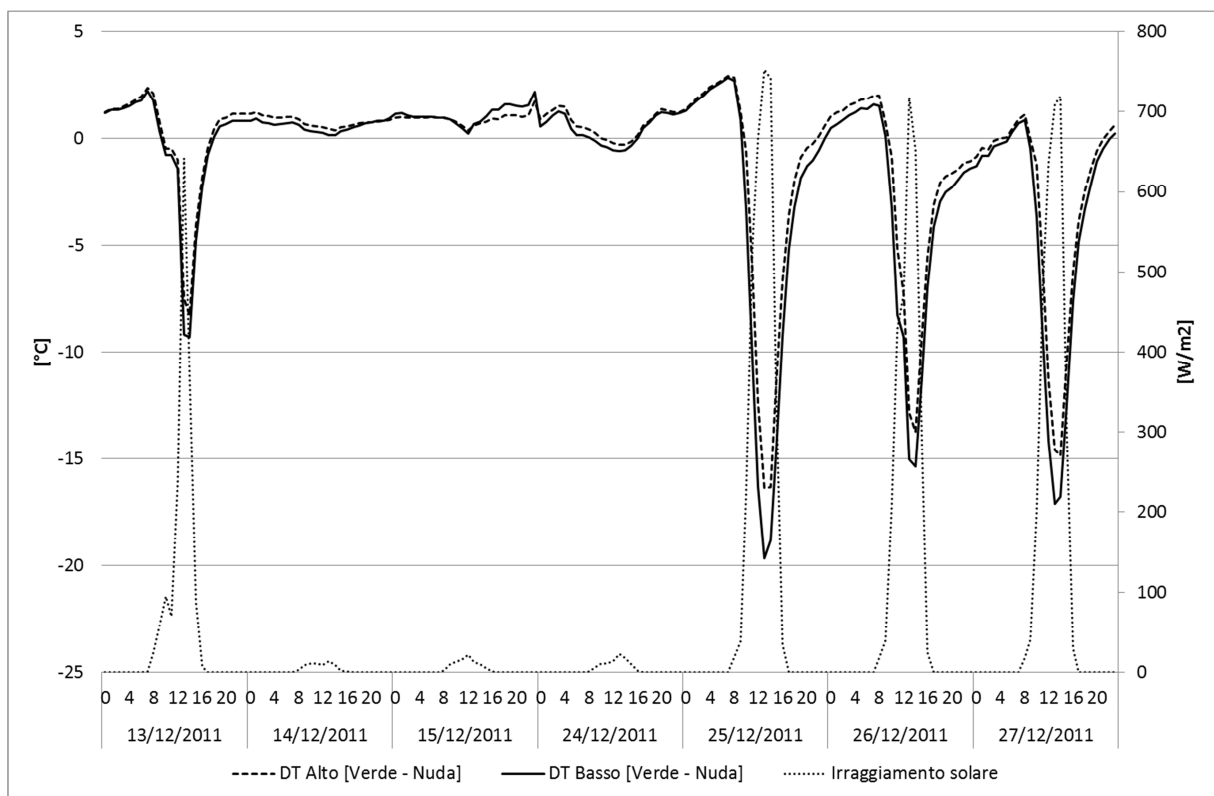


Figura 36 - Andamento differenza di temperatura (DT) Parete verde – Parete nuda e interazione radiazione solare

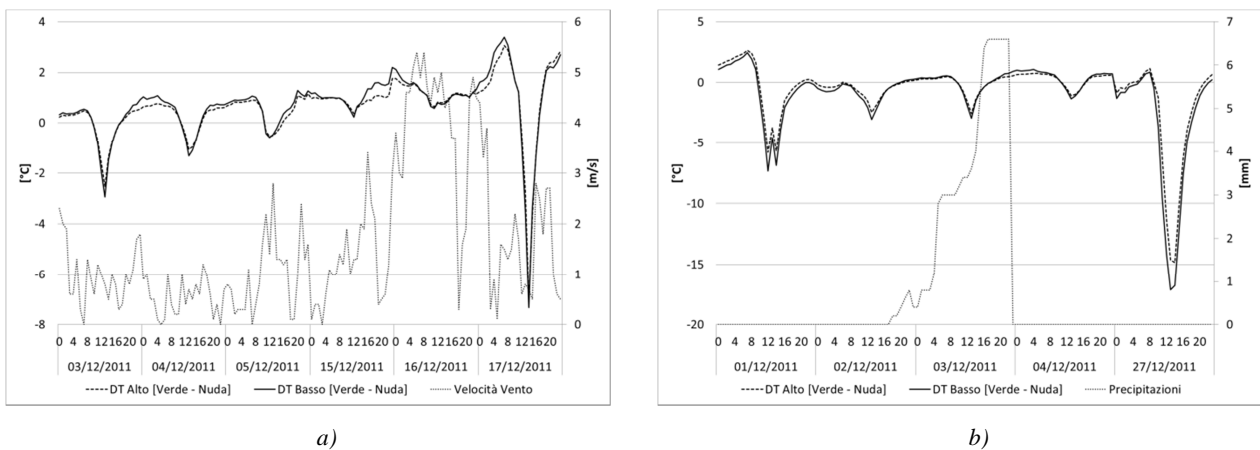


Figura 37 - Andamento differenza di temperatura (DT) Parete verde – Parete nuda. a) interazione con vento; b) interazione con precipitazioni

Riassumendo, interessante risulta il comportamento delle temperature superficiali esterne durante i giorni con scarsa radiazione solare (molto diffusi nel periodo invernale). La parete verde sembra proteggere la struttura retrostante e mantenerne le temperature superficiali leggermente più alte di quelle della parete nuda. La differenza è di 1°C – 2°C. Nel grafico in Figura 38 è evidenziato tale comportamento per tutto il mese di Dicembre. La condizione appena descritta si verifica per 15 giorni su 31. Va sempre considerato, inoltre, l'effetto schermante della parete verde che blocca il re irraggiamento notturno della struttura retrostante evitandone il raffreddamento.

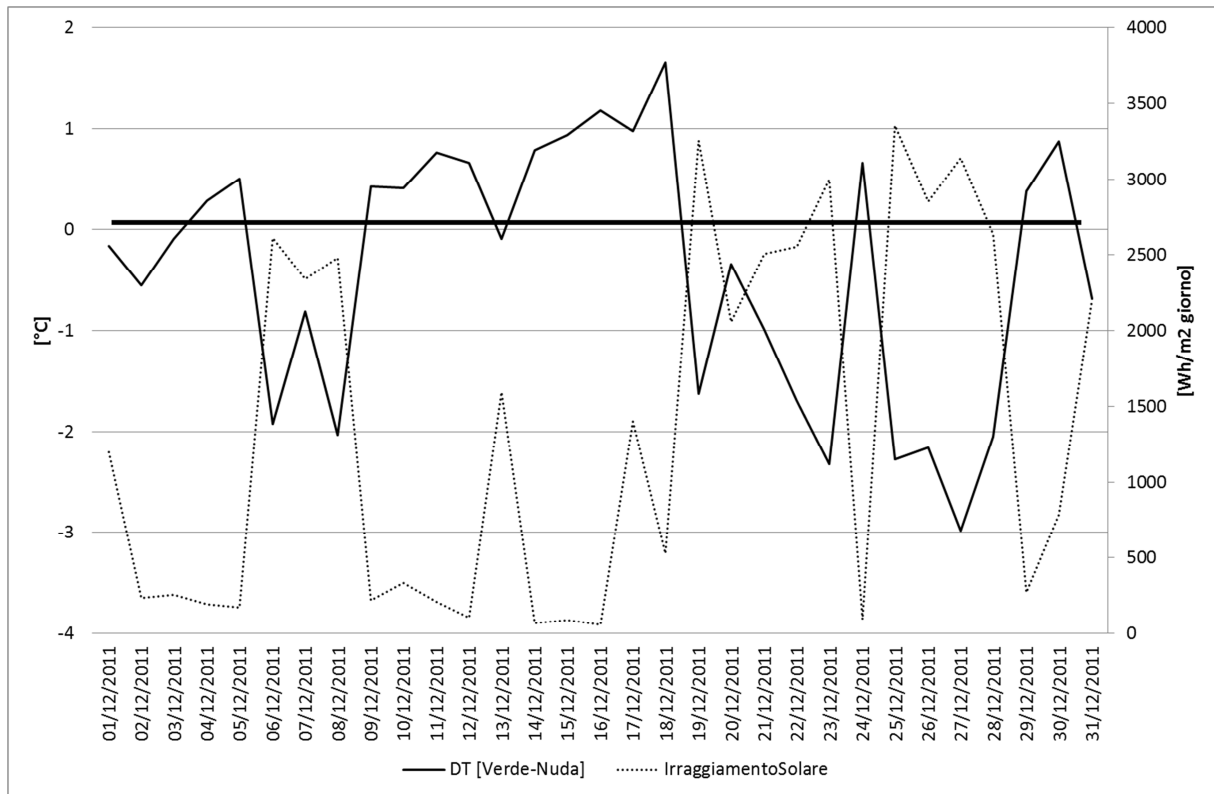


Figura 38 - Andamento differenza di temperatura (DT) Parete verde – Parete nuda durante il mese di Dicembre 2012

4.1.2.2. ANALISI UMIDITA' RELATIVA

In Figura 39 è visibile il comportamento dell'umidità relativa in funzione della radiazione solare. In particolare è rappresentata la differenza di umidità relativa tra la sonda a 50 cm dal fogliame e la sonda di misura dell'aria esterna. Durante i giorni nuvolosi (ridotto apporto radiativo), i valori di umidità relativa all'interno del fogliame, a 50 cm dal fogliame e dell'aria esterna si muovono con andamenti molto simili. La differenza maggiore si registra, invece, in momenti in cui la radiazione solare, che ancora una volta si dimostra la forzante climatica più influente, è massima. In questi periodi i valori di umidità relativa si differenziano, in particolare, le differenze tra i valori a 50 cm dalle foglie (quindi in prossimità dell'installazione verde) e quelli dell'aria indisturbata sono dell'ordine del 10% durante la notte, nei periodi soleggiati e si invertono fino a -20% durante le giornate soleggiate in cui è l'aria esterna ad essere più umida. Si ricorda che a valori positivi corrispondono valori di umidità relativa, in prossimità del giardino verticale, più alti rispetto a quelli misurati in condizioni indisturbate. Un simile andamento può essere giustificato dal maggior surriscaldamento delle superfici e quindi ad una diminuzione dell'umidità relativa nei pressi del giardino, rispetto all'innalzamento della temperatura dell'aria esterna che, seppur collegato ad una diminuzione dell'umidità relativa, non è paragonabile a quello vicino al *Living Wall*. Il comportamento si inverte durante le ore notturne in cui la parete si raffredda maggiormente dell'aria esterna e vede quindi salire i valori di umidità relativa nelle immediate vicinanze.

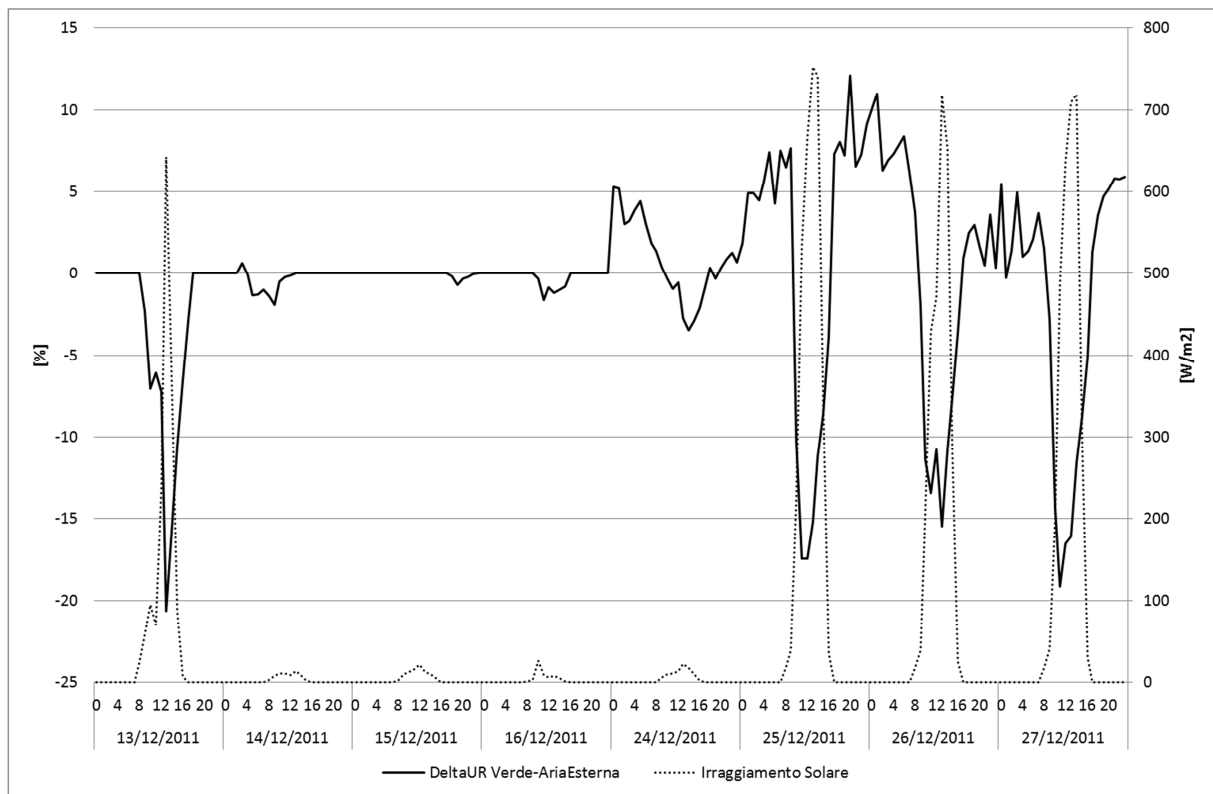


Figura 39 – Andamento differenza di umidità relativa Parete Verde – Aria esterna

4.1.2.3. ANALISI VELOCITA' DELL'ARIA IN INTERCAPEDINE

Il moto dell'aria nell'intercapedine aperta del giardino verticale durante il periodo invernale non è di così chiara caratterizzazione come quello durante il periodo estivo. Come visibile in Figura 40 il moto dell'aria in intercapedine è prevalentemente di tipo discendente essendo il valore del sensore di velocità dell'aria posizionato in alto, per circa il 70% del tempo, maggiore del valore misurato in basso. Questo comportamento è meno chiaro del comportamento estivo che vedeva una evidente alternanza giorno notte. Tale andamento è giustificato da una differenza di temperatura ridotta tra l'interno dell'intercapedine e l'esterno in condizioni aperte che oscilla tra -1°C e 1°C a differenza del periodo estivo tale valore poteva raggiungere anche i 7°C – 8°C .

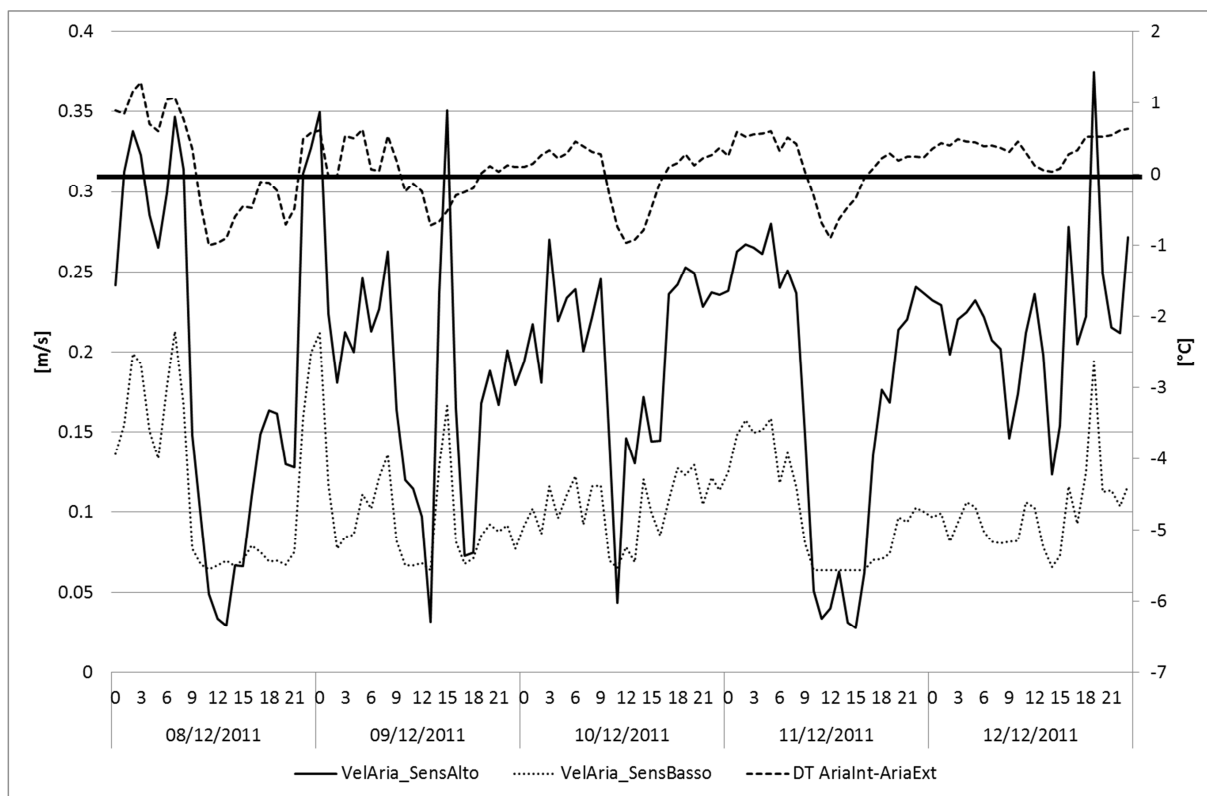


Figura 40 – Andamento velocità dell'aria nell'intercapedine aperta

4.1.2.4. ANALISI FLUSSI DI CALORE

Come visibile in Figura 41 i flussi di calore, sono anche in questo caso, come nel caso estivo, strettamente collegati alla radiazione solare. Il flusso di calore assume un valore positivo, entrante nella parete, quando la forzante solare comincia ad irraggiare la parete esposta. Il contributo è tanto maggiore quanto la presenza di ostruzioni è ridotta al minimo, come nel caso della parete nuda. Tuttavia proprio per l'assenza di ostruzioni la parete nuda è sottoposta ad irraggiamento notturno verso la volta celeste fredda. Questo interessante comportamento è ben visibile in figura e si legge chiaramente dall'inversione del flusso durante le ore notturne. Tale andamento non caratterizza invece il flusso sulla parete vegetale che, nonostante mostri anch'esso valori negativi durante le ore notturne, si mantiene su livelli meno negativi. In un bilancio complessivo, la sommatoria settimanale dei flussi orari restituisce un valore negativo (flusso uscente), come visibile in Figura 42. Dal rilievo microclimatico effettuato durante i 40 giorni di monitoraggio tra il mese di Dicembre 2012 ed il mese di Gennaio 2013, la parete verde sembra ridurre le dispersioni di calore attraverso la parete su cui è installata di circa il 37%.

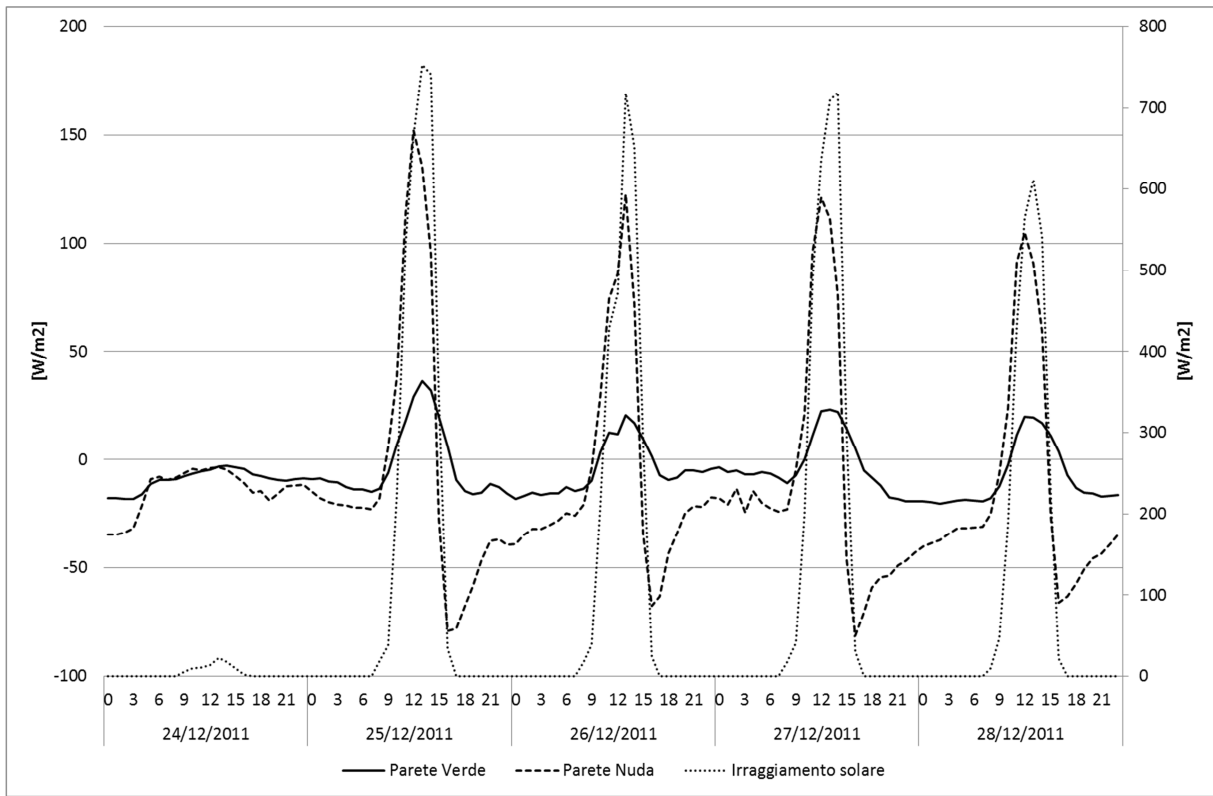


Figura 41 – Andamento flussi di calore

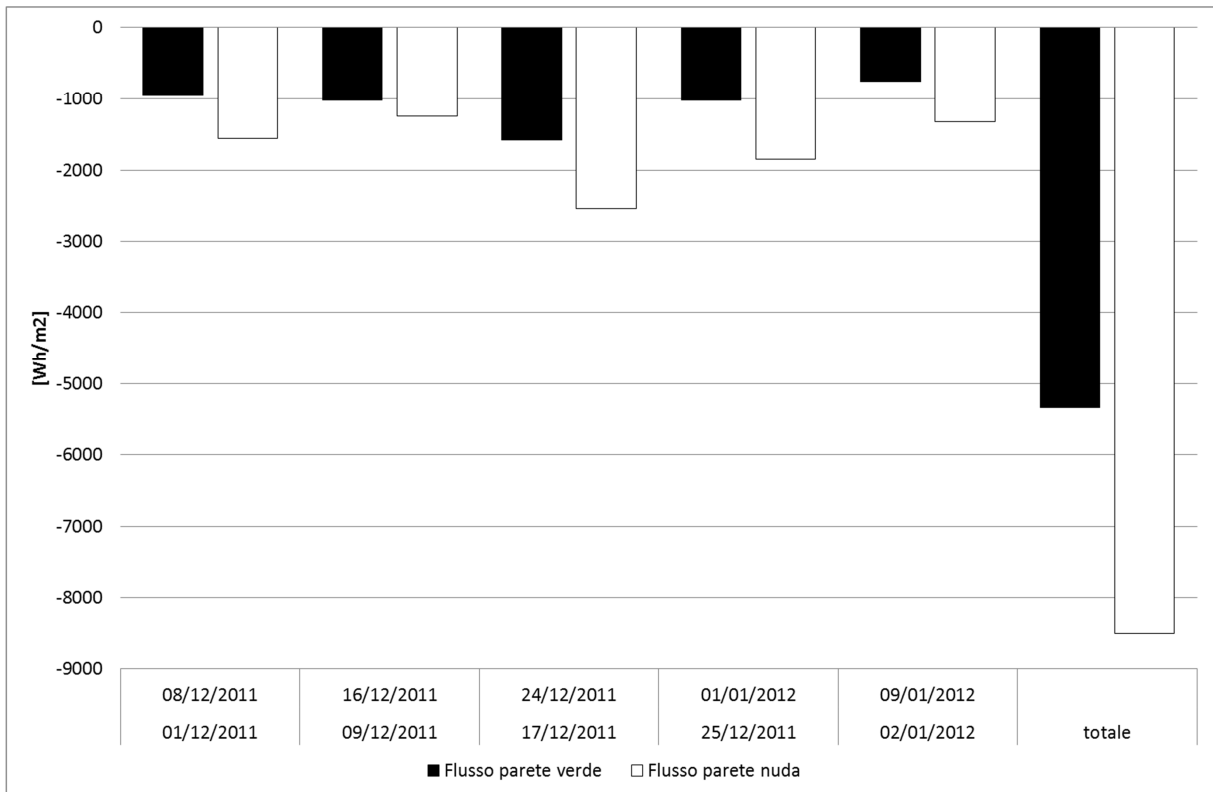


Figura 42 – Bilancio settimanale flussi di calore

4.1.3. CONCLUSIONI MONITORAGGIO LW-GaOp

Durante il periodo estivo, dall'analisi delle temperature, emerge che la differenza di temperatura superficiale tra una parete ricoperta da *Living Wall* una parete senza copertura vegetale può arrivare fino a 20°C nei giorni più soleggiati. Tale differenza si riduce a 5°C nei giorni meno soleggiati. La differenza di temperatura superficiale risulta in evidente dipendenza dalla radiazione solare mentre non risulta particolarmente influenzata dalle altre forzanti climatiche come vento, piovosità e umidità relativa. Sempre durante il periodo estivo, l'umidità relativa nei pressi del rivestimento vegetale subisce variazioni che non superano il 5% - 15% rispetto a condizioni indisturbate monitorate a distanza. Per ciò che riguarda il movimento dell'aria nell'intercapedine retrostante al rivestimento vegetale è stato riscontrato un flusso discendente durante il periodo diurno ed ascendente durante quello notturno coerente con l'andamento delle temperature dell'aria nell'intercapedine e all'esterno. Un'ultima analisi riguarda il flusso di calore entrante attraverso le pareti monitorate, tale grandezza risulta ridotta di circa il 70%-80% per effetto della protezione vegetale installata di fronte al muro.

Durante il periodo invernale, risulta interessante il comportamento delle temperature superficiali esterne nei giorni di scarsa radiazione solare (molto diffusi nel periodo invernale). Si sono registrati valori delle temperature superficiali del muro retrostante alla protezione verde più alti rispetto agli omologhi registrati sulla parete nuda fino 1°C – 2°C.

L'analisi dell'umidità relativa durante il periodo invernale non mostra particolari interessanti rispetto all'andamento estivo con variazioni del 10%-20% tra l'aria nelle vicinanze del giardino verticale e quella in condizioni indisturbate. Il moto dell'aria è di difficile caratterizzazione se paragonato al caso estivo, Le misure mostrano un moto quasi sempre discendente e probabilmente causato da una differenza di temperatura dell'aria intercapedine-esterno che non supera mai valori di 1°C – 2°C.. Un'ultima considerazione riguarda i flussi di calore durante il periodo invernale, durante tale periodo, infatti, la presenza del rivestimento vegetale riduce le dispersioni di calore attraverso la parete su cui è installata di circa il 35%-40% durante i 40 giorni di monitoraggio tra il mese di Dicembre ed il mese di Gennaio.

E' da ricordare che i valori espressi sono relativi esclusivamente al contesto di monitoraggio descritto in precedenza e che risultano in funzione di molteplici variabili, come ampiamente descritto, tra cui la temperatura esterna, la radiazione solare e la temperatura dell'ambiente interno.

4.2. LIVING WALL A PRATO VERTICALE CON INTERCAPEDINE CHIUSA (LW-GrCI)

Nel 2012 è stato effettuato un secondo monitoraggio microclimatico di un rivestimento architettonico vegetale presso il Laboratorio di Fisica Tecnica dell'Università IUAV di Venezia a Mestre (VE). Il rilievo è iniziato nella prima settimana di Luglio per terminare a metà Febbraio 2013, tale periodo ha consentito di raccogliere i dati necessari per la caratterizzazione del comportamento termofisico del *Living Wall* in condizioni sia estive che invernali. La struttura del secondo *Living Wall* monitorato, offerto dalla ditta Verde Profilo, si differenzia dalla prima struttura per la presenza di erba pre-seminata in luogo di giardino verticale e per la chiusura dell'intercapedine d'aria retrostante al rivestimento. Nel primo caso l'intercapedine risultava aperta e tale condizione è stata ampiamente descritta nei risultati al paragrafo 4.1.1.2. Un foto di dettaglio e complessiva del secondo prototipo monitorato è visibile in Figura 43. Il campione è composto da un singolo strato di feltro su cui viene pre-seminata erba la cui sopravvivenza è garantita dall'irrigazione continua, vista la mancanza di substrato in terra, effettuata mediante acqua e fertilizzante.



Figura 43 – Dettaglio secondo prototipo di Living Wall monitorato. a) dettaglio substrato; b) installazione su parete

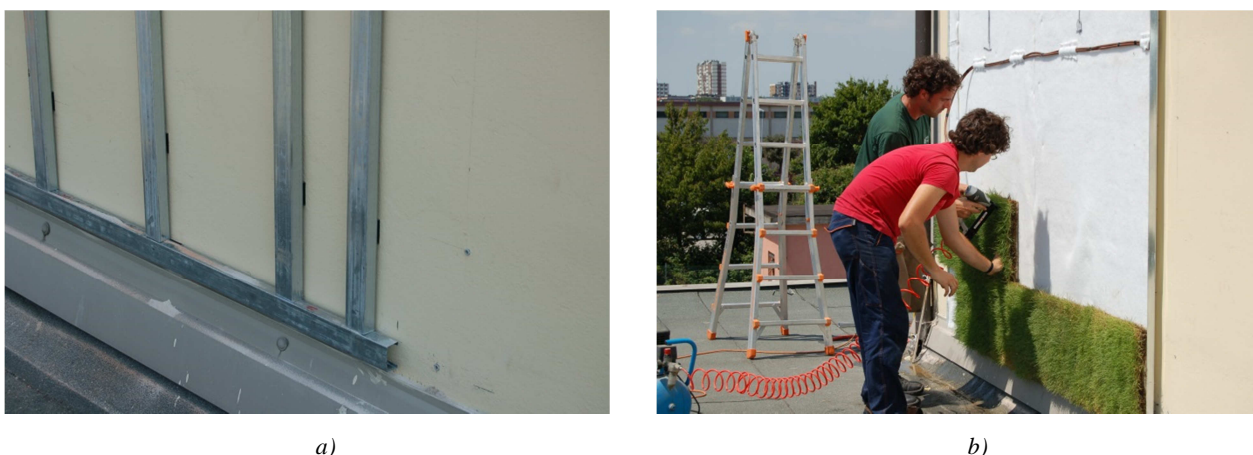


Figura 44 – a) dettaglio intercapedine chiusa; b) fase di montaggio finale con prato

Come è possibile notare, in Figura 44 viene riportato il dettaglio dell'intercapedine chiusa formata dai montanti verticali e dal montante orizzontale che di fatto impedisce il passaggio d'aria dietro il *Living Wall*. Viene inoltre riportata una fase di montaggio lo strato di Forex, il tubo di irrigazione e i rettangoli d'erba preseminati che vengono fissati con apposite graffe al Forex sottostante.

La parete monitorata è orientata a Sud – Ovest come per il primo caso e ad una latitudine di 45°28' N corrispondente alla città di Venezia. Il posizionamento delle sonde è riportato in Figura 45. La nomenclatura delle variabili monitorate ha seguito la seguente codifica:

- Temperatura superficiale: ST_B , ST_{LW}
- Temperatura aria: AT
- Umidità relativa aria: ARH
- Flusso di calore: HF_B , HF_{LW}
- Irraggiamento solare: SR

il pedice B indica la porzione di muro nuda e il pedice LW indica la porzione di muro ricoperta da *Living Wall*. In Tabella 4 sono riepilogate le sonde utilizzate per il monitoraggio. A differenza del primo caso non sono stati utilizzati i sensori di velocità dell'aria essendo l'intercapedine chiusa e sono state utilizzate solo sonde di tipo HOBO per il monitoraggio delle variabili microclimatiche di temperatura aria e umidità relativa.

Tabella 4 – Riepilogo sonde utilizzate per il monitoraggio

VARIABILE MONITORATA	TIPO DI SONDA	ACCURATEZZA
Temperatura superficiale	PT 100	0,2 °C
Flusso di calore	Hukseflux	
Temperatura aria	Hobo prov2	+/- 0,18°C a 25°C
Umidità aria	Hobo prov2	+/- 2,5 da 10% a 90%
Radiazione solare	Kipp&Zonen CM6B	9-15 $\mu\text{v}/\text{wm}^{-2}$

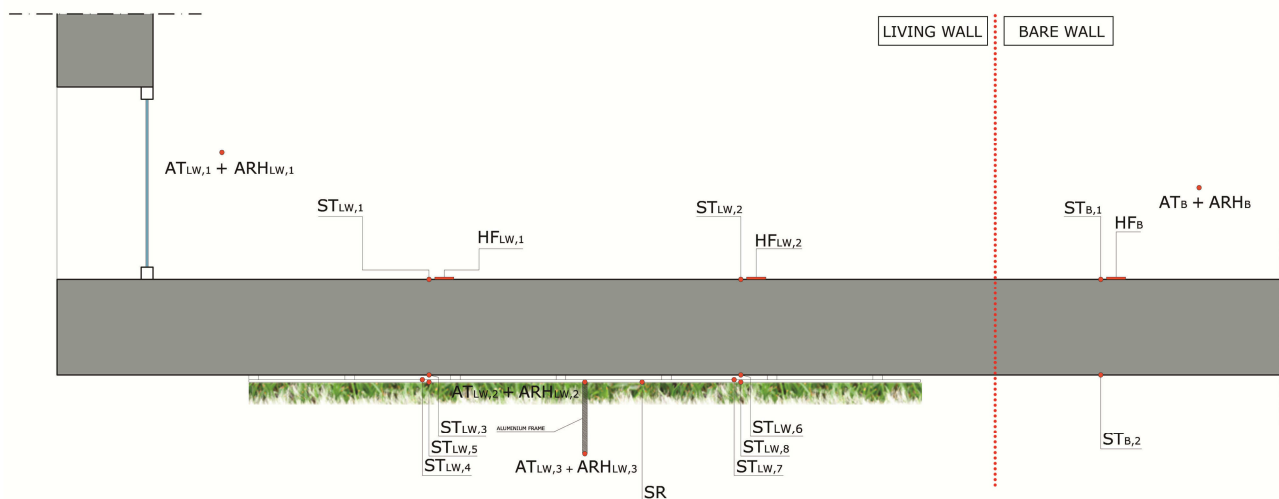


Figura 45 – Sezione parete verde con posizionamento sonde

4.2.1. RISULTATI PERIODO ESTIVO LW-GrCI

All'interno del periodo di monitoraggio estivo si sono individuati 2 periodi, della durata di 1 settimana, in cui la forzante climatica della radiazione solare, ritenuta tra le più influenti, fosse massima e minima. I periodi individuati sono:

- settimana più soleggiata: dal 30 Luglio a 5 Agosto 2012
- settimana meno soleggiata: dal 30 Agosto al 6 Settembre 2012

In questi periodi è stato analizzato l'andamento delle temperature superficiali e dei flussi di calore in funzione dell'incidenza della radiazione solare sul rivestimento analizzato.

Durante il periodo più soleggiato la temperatura dell'aria si è mantenuta molto elevata, oscillando tra i 22°C notturni e i 39°C diurni. Anche la radiazione solare ha registrato valori molto elevati con picchi di 665 W/m² registrati sul piano del prato verticale. Nel periodo meno soleggiato invece la temperatura si è mantenuta tra i 16°C e i 25°C e la radiazione solare non ha superato valori di 300 W/m². In Figura 46 sono riportati gli andamenti microclimatici principali dei due periodi individuati.

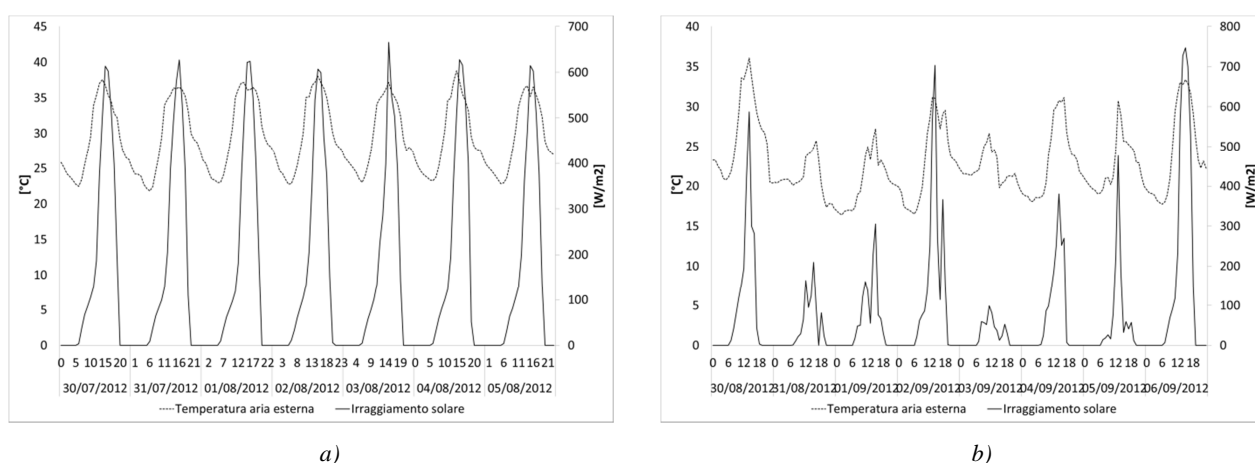
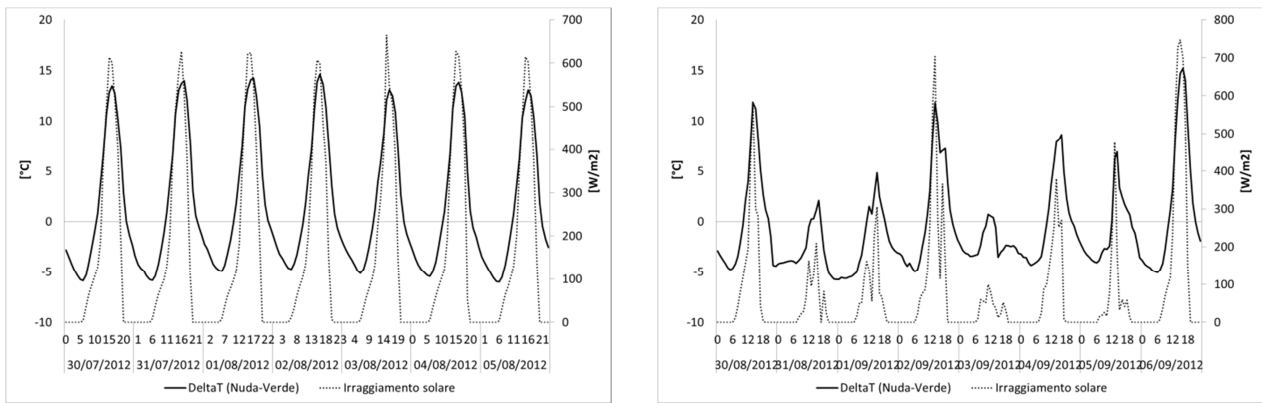


Figura 46 – Andamento microclima periodo estivo. a) settimana soleggiata; b) settimana nuvolosa

4.2.1.1. ANALISI TEMPERATURE SUPERFICIALI

Nel periodo di massimo irraggiamento la differenza tra la temperatura superficiale esterna della porzione di parete non ricoperta da vegetazione e quella dietro al rivestimento vegetale arriva a circa 14°C, come evidenziato in Figura 47a. Durante la notte, tuttavia, la parete nuda tende a raffreddare molto di più la sua temperatura superficiale anche per effetto della riemissione di calore per irraggiamento verso il volta celeste. Tale temperatura può scendere fino a 6°C oltre il corrispondente valore della temperatura dietro il rivestimento.

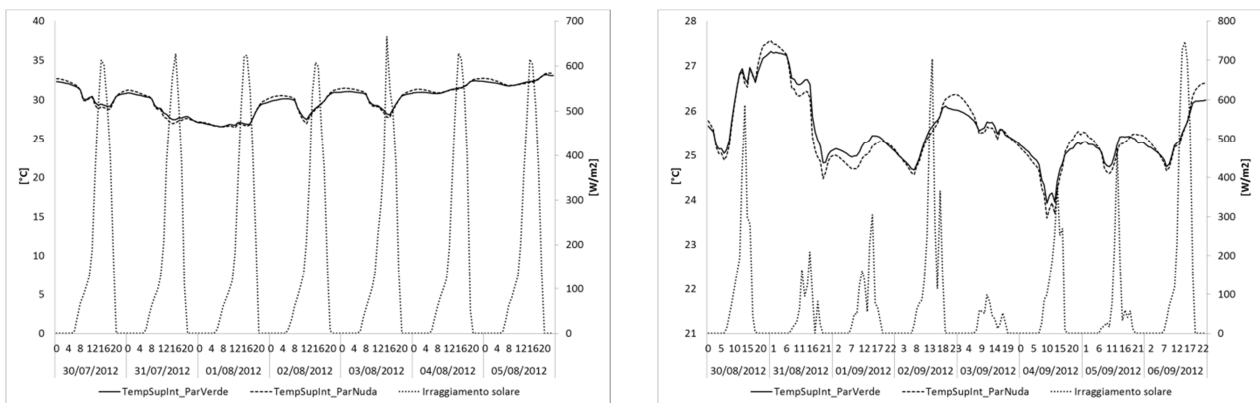
Durante il periodo poco soleggiato, riportato in Figura 47b, la differenza tra le temperature superficiali esterne con la presenza o meno del rivestimento vegetale, si riduce molto e si attesta intorno a valori di 1°C – 2°C, come ci si poteva aspettare venendo a mancare il grosso contributo della radiazione solare, la forzante climatica più influente. Durante le ore notturne, invece, il comportamento è simile al caso soleggiato.



a) b)
 Figura 47 – Andamento differenza di temperatura superficiale e interazione con radiazione solare durante:
 a) settimana soleggiata e b) settimana nuvolosa.

Per ciò che riguarda le temperature superficiali interne durante il periodo soleggiato, mostrate in Figura 48a, è possibile notare come la temperatura della superficie interna presenti i valori massimi sfasati di circa 9 ore rispetto al picco di radiazione solare esterna che di fatto è la forzante climatica più forte. E' possibile inoltre notare come la temperatura della superficie in corrispondenza della parete nuda sia costantemente più alta durante il periodo notturno di circa 0.5 °C. Tali valori ricadono in parte nel range di accuratezza delle sonde utilizzate.

L'andamento delle temperature superficiali interne nel periodo nuvoloso, mostrato in Figura 48b, rivela un comportamento diverso rispetto a periodi di forte soleggiamento. Infatti, a differenza di tali periodi, in momenti di scarsa incidenza della radiazione solare, le temperature superficiali interne dietro la parete verde si mantengono leggermente più alte rispetto a quelle in corrispondenza della parte nuda. Comportamento che non si verifica mai nei giorni di forte irraggiamento solare.



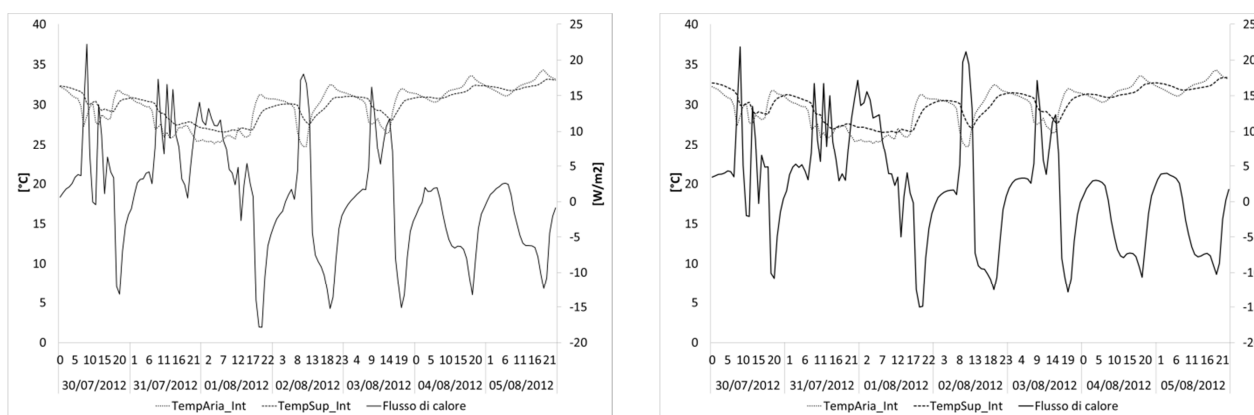
a) b)
 Figura 48 - Andamento temperatura superficiale interna e interazione con radiazione solare durante:
 a) settimana soleggiata e b) settimana nuvolosa.

4.2.1.2. ANALISI FLUSSI DI CALORE

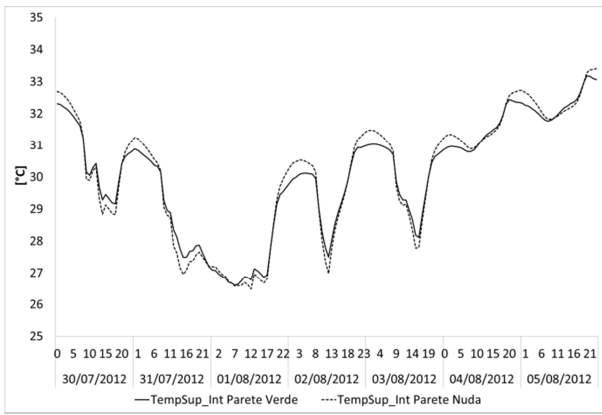
Nei grafici successivi viene riportato l'andamento dei flussi di calore e delle temperature ai due lati della sonda termoflussimetrica. Per convenzione si è scelto di stabilire che a valori positivi corrisponde un flusso di calore entrante, a valori negativi un flusso di calore uscente dall'ambiente condizionato.

Viene riportato in Figura 49 l'andamento dei flussi calore della parete verde (Figura 49a) e della parete nuda (Figura 49b). E' possibile notare che durante i giorni della settimana dal 30 Luglio al 3 Agosto, quando le sonde sono fortemente influenzate dalla presenza di persone e apparecchiature nell'ambiente interno, l'andamento dei flussi di calore è molto instabile e risulta difficile caratterizzarne il comportamento. Durante i giorni di fine settimana, 4 e 5 Agosto, quando la situazione interna è più stabile, risulta più evidente l'andamento dei flussi. Durante questi giorni, infatti, nelle ore diurne la temperatura dell'aria interna si alza, mentre quella della superficie è attenuata e sfasata, questa condizione porta ad un flusso di calore uscente dall'ambiente. Viceversa durante le ore notturne quando la condizione si inverte il flusso di calore risulta positivo e di conseguenza entrante per la convenzione adottata. La stessa condizione si verifica sia in condizioni di parete vegetale che di parete nuda, con alcune differenze.

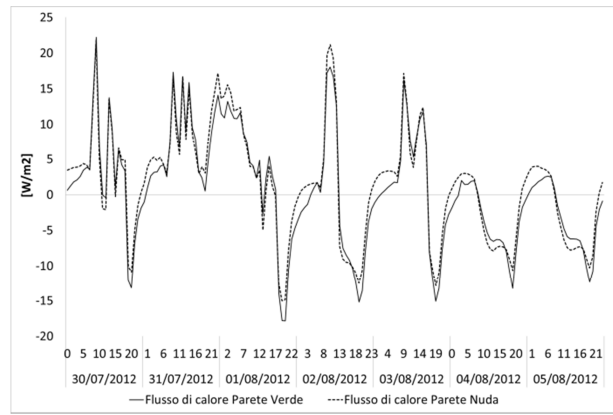
In Figura 50 è riportato un confronto tra i valori di temperatura superficiale (Figura 50a) e flusso di calore (Figura 50b). E' evidente come la temperatura superficiale interna in corrispondenza della parete verde resti più bassa del corrispondente valore sulla parete nuda. Tuttavia tale differenza non è significativa e si attesta intorno a 0.5 °C. Il notevole effetto schermante che il rivestimento vegetale genera all'esterno si attenua molto e la differenza dopo l'attraversamento della parete è molto ridotta. Un ruolo fondamentale gioca la capacità termica della struttura retrostante che trattiene buona parte dell'energia incidente. Medesime considerazioni possono esser fatte anche analizzando i flussi da calore. Il flusso di calore positivo, entrante, risulta nella maggioranza dei casi più elevato in corrispondenza della parete nuda. A parità di temperatura dell'aria interna infatti, la temperatura superficiale interna in corrispondenza della parete nuda è, come visto, sempre più alta.



a) b)
Figura 49 – Analisi flussi di calore. a) Parete verde; b) Parete Nuda



a)

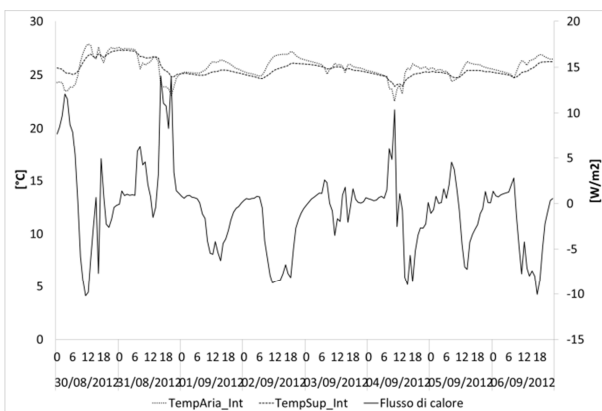


b)

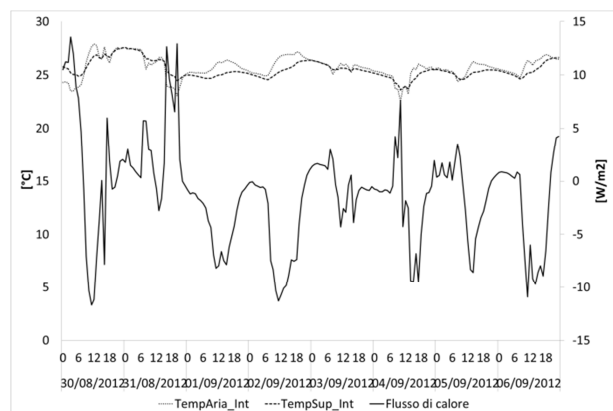
Figura 50 – Confronto Parete Verde – Parete Nuda. a) Confronto temperature superficiali; b) Confronto flussi di calore

Nei giorni a minor irraggiamento solare del periodo estivo si registra una decisa riduzione dei flussi di calore entranti nell'ambiente ed è possibile riscontrare la stessa instabilità dei flussi di calore durante i giorni in cui c'è la presenza di personale all'interno degli uffici retrostanti la parete monitorata. L'andamento dei flussi in corrispondenza della parete verde è riportato in Figura 51a e lo stesso andamento per la parete nuda in Figura 51b dove medesime considerazioni possono essere fatte. Risulta evidente, infatti, come durante giorni di minor irraggiamento non si riscontrino bassi flussi di calore positivi, restando le temperature superficiali interne sempre più basse di quelle dell'aria interna. Da Figura 52 è possibile vedere come complessivamente, nell'arco di tempo in cui le forzanti climatiche sono più deboli, ci sia un ridotto contributo di energia entrante nell'ambiente. I flussi di calore sono quasi sempre negativi (uscenti) con picchi di -10 W/m^2 - -12 W/m^2 .

In Figura 53 è riportato un bilancio complessivo per il periodo di monitoraggio dal 5 Luglio 2012 all'11 Settembre 2012. Il bilancio totale di energia è stato diviso in flusso positivo (energia entrante) e flusso negativo (energia uscente). Nel periodo monitorato l'energia entrante attraverso la parete su cui era stato installato il *Living Wall* è stata di circa 3940 Wh/m^2 , mentre quella uscente di circa 3870 Wh/m^2 . Attraverso la parete nuda il totale dell'energia entrante è stato di circa 4500 Wh/m^2 ed il totale di energia uscente di circa 3750 Wh/m^2 .

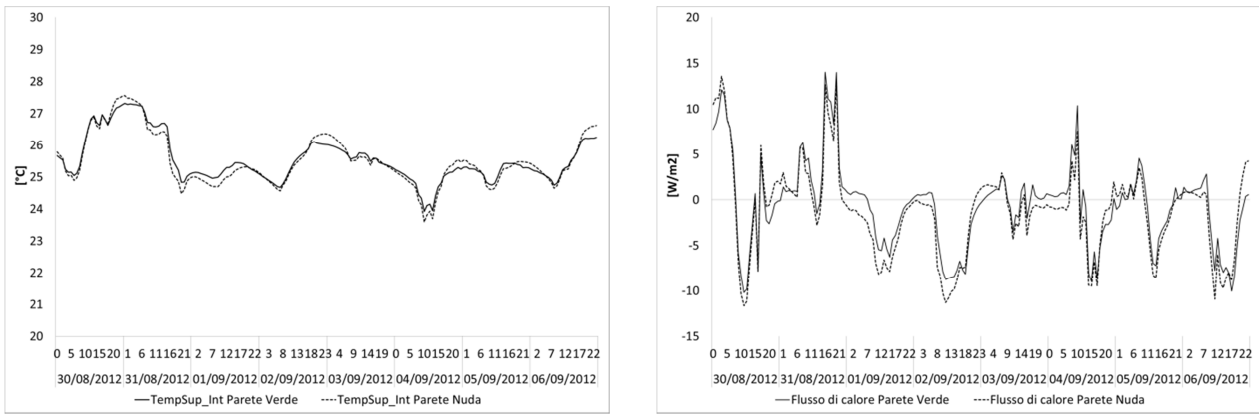


a)



b)

Figura 51 – Analisi flussi di calore. a) Parete verde; b) Parete Nuda



a) b)
 Figura 52 - Confronto Parete Verde – Parete Nuda. a) Confronto temperature superficiali; b) Confronto flussi di calore

Complessivamente l'energia entrante nell'ambiente è maggiore, circa 11 volte, in corrispondenza della parete nuda. Si passa infatti da un valore complessivo di 67 Wh/m² per la parete verde a circa 730 Wh/m² registrati in corrispondenza della parete nuda. Per completezza è stato effettuato un monitoraggio in condizioni interne più stabili, mantenendo durante il fine settimana un setpoint costante di 24°C. In queste condizione è stato possibile confermare le ipotesi già fatte nel regime di temperature meno controllato.

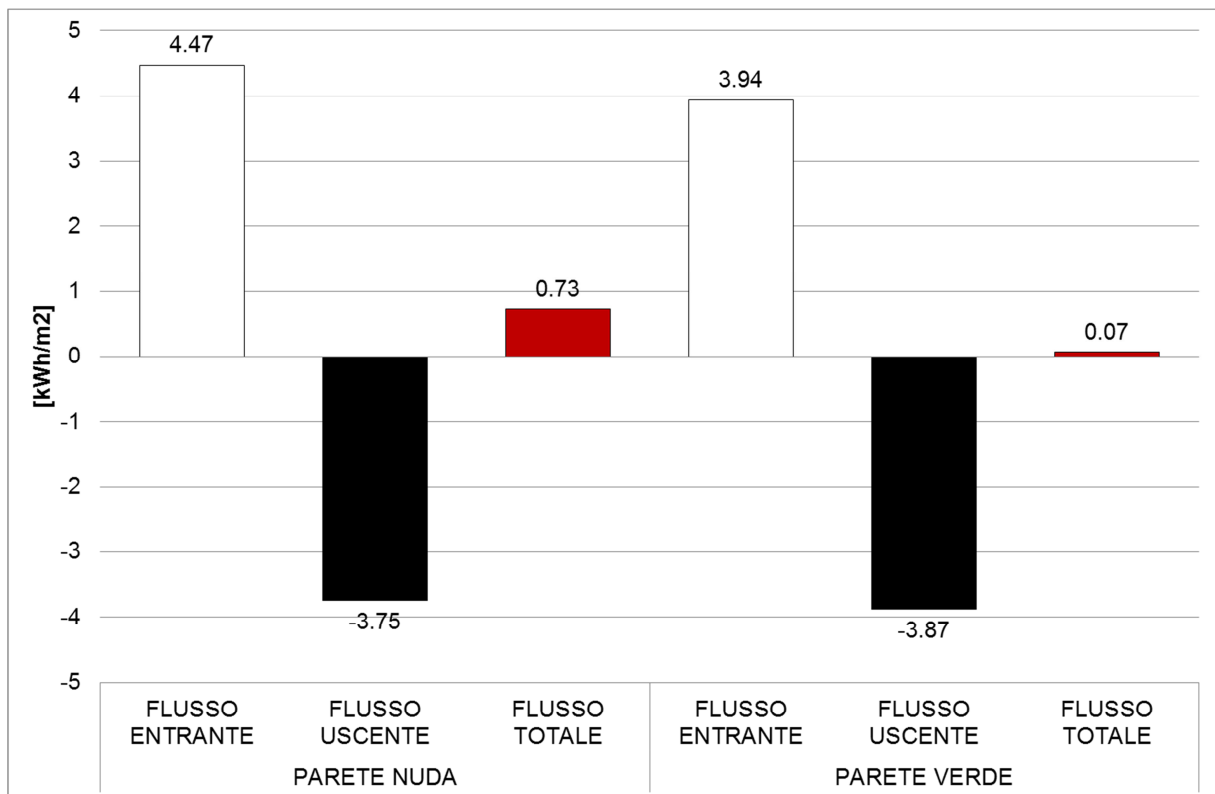


Figura 53 – Bilancio flussi periodo estivo

4.2.2. RISULTATI PERIODO INVERNALE LW-GrCI

Anche in questo caso, come in tutti gli altri periodi analizzati, si sono individuati dei periodi in cui le forzanti climatiche risultassero evidenti. In particolare per il periodo invernale i periodi individuati sono stati i seguenti:

- periodo più soleggiato: dal 8 Febbraio al 10 Febbraio 2013
radiazione solare fino a $700 \text{ W/m}^2 - 800 \text{ W/m}^2$
- periodo meno soleggiato: dal 31 Gennaio al 2 Febbraio 2013
radiazione solare fino a 200 W/m^2

4.2.2.1. ANALISI TEMPERATURE SUPERFICIALI

L'andamento delle temperature superficiali sia interne che esterne, durante il periodo soleggiato, è riportato in Figura 54. E' subito chiaro come le temperature superficiali esterne subiscano l'evidente influenza del prato verticale. L'andamento della differenza di temperatura mostra come il valore della temperatura superficiale della parete nuda sia più alto del corrispondente valore della parete verde solo durante il periodo di irraggiamento solare. Nel resto delle ore la temperatura superficiale dietro il rivestimento vegetale si mantiene costantemente più elevata, soprattutto durante le ore notturne arrivando a differenze anche nell'ordine di 10°C (Delta T negativo). Tale comportamento è, come ormai appare chiaro, dovuto alla difficoltà della parete dietro il *Living Wall* di emettere calore per irraggiamento verso la volta celeste per la presenza del rivestimento stesso. Durante il periodo estivo questo è un punto debole, ma durante il periodo invernale consente di mantenere la temperatura della parete, dietro il prato verticale, più calda.

Significativo è anche il comportamento delle temperature superficiali interne nelle due sezioni di muro e riportate in Figura 54b come differenza di temperatura. Interessante notare come la temperatura superficiale interna in corrispondenza della parete senza rivestimento sia costantemente più bassa di circa 3°C .

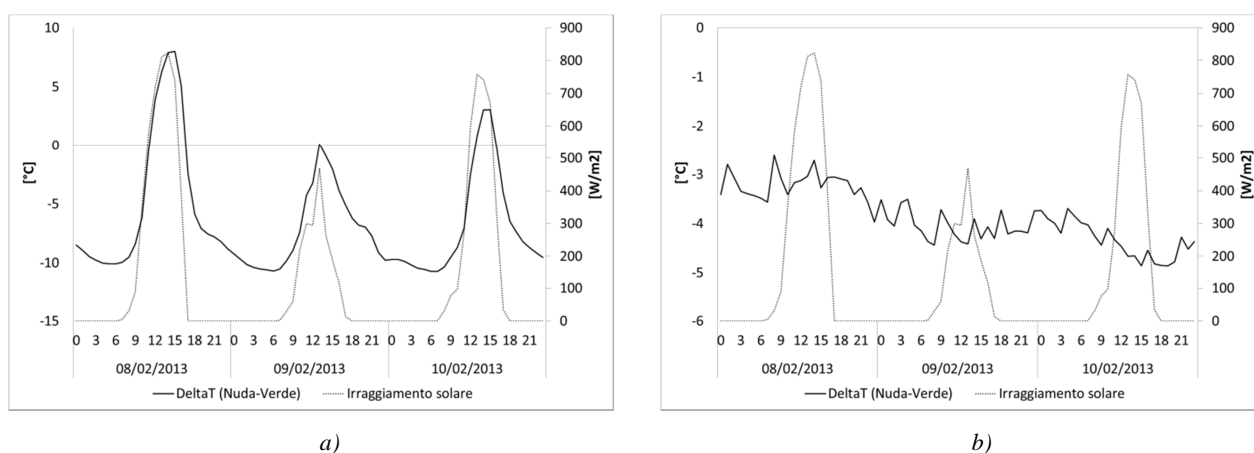


Figura 54 – Andamento differenza di temperatura Parete Nuda – Parete Verde: a) superficie esterna; b) superficie interna

Il secondo periodo invernale identificato per l'analisi dei dati di dettaglio va dal 31 Gennaio al 02 Febbraio 2013. Le giornate risultano nuvolose e durante tale periodo è possibile notare, come riportato in Figura 55, che le temperature superficiali esterne della parete nuda e di quella verde, riportate anche in questo caso come

differenza di temperatura, conservano sempre un comportamento in funzione della radiazione solare, ma in questa occasione, a differenza del caso soleggiato, la quantità di energia in arrivo dal sole non è sufficiente ad innalzare il valore della temperatura superficiale esterna della parete nuda che si mantiene costantemente sotto il valore della corrispondente sonda dietro il rivestimento vegetale fino a valori di 8°C. In questo periodo i valori delle temperature superficiali interne, riportate in Figura 55b evidenziano un andamento simile al caso soleggiato ma con valori più bassi e più scostati dalla temperatura dell'aria dell'ambiente chiuso retrostante la parete. Le temperature superficiali nei due punti della parete sono pressoché simili e si discostano dal valore dell'aria ambiente in media con valori di 2.7°C.

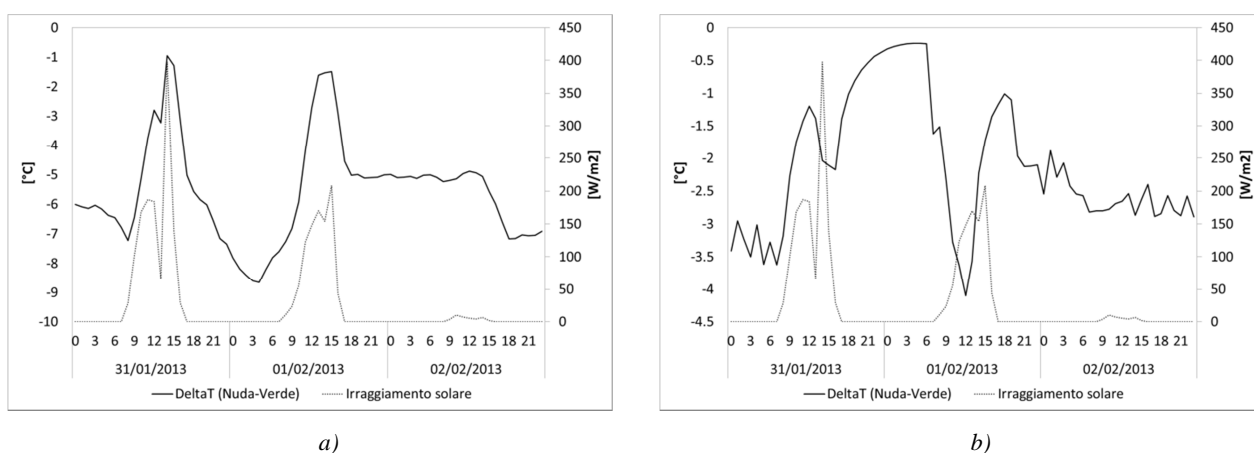


Figura 55 – Andamento differenza di temperatura Parete Nuda – Parete Verde: a) superficie esterna; b) superficie interna

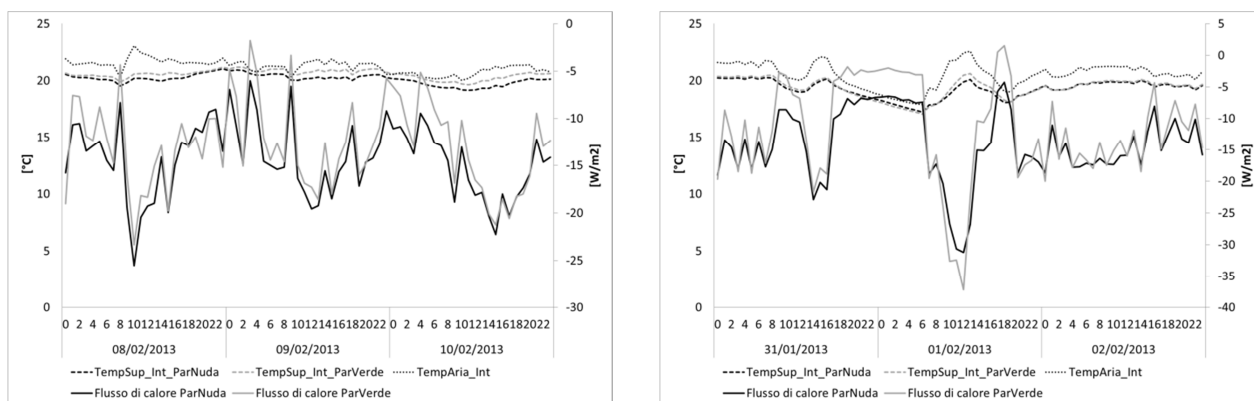
4.2.2.2. ANALISI FLUSSI DI CALORE

In Figura 56 viene riportato l'andamento dei flussi di calore e delle temperature, aria e superficie, queste ultime necessarie a comprendere meglio l'andamento dei flussi. È possibile notare come le temperature superficiali della parete interna, sia in corrispondenza della porzione di parete nuda che di quella rivestita, siano costantemente più basse della temperatura dell'aria nell'ambiente interno retrostante la parete monitorata. Tale situazione comporta flussi di calore costantemente negativi ed uscenti dalla parete edilizia.

Analizzando nel dettaglio l'andamento del flusso di calore è possibile notare come l'energia uscente dalla parete nella sua porzione libera da rivestimento vegetale, sia complessivamente maggiore dell'energia uscente dalla porzione di parete ricoperta dal prato verticale. Alcune brevi inversioni di tale situazione avvengono in corrispondenza di picchi di radiazione solare che incidono ovviamente in maggior misura sulla parete senza rivestimento. Le differenze sono nell'ordine di 5 W/m².

Interessante è l'andamento del flusso di calore in un periodo nuvoloso in cui la forzante climatica della radiazione solare non è significativa. Anche in questo periodo infatti, come visibile in Figura 56b, l'energia uscente dalla parete è maggiore nella porzione non protetta dal rivestimento vegetale e questa situazione ha un andamento pressoché costante. Lo scostamento massimo tra la potenza uscente in corrispondenza della parete nuda e quella uscente in corrispondenza della parete vegetale arriva fino ad un massimo di circa 6 W/m².

Un'ultima analisi riguarda il bilancio complessivo dei flussi di calore in un periodo di circa un mese durante la stagione invernale. I dati visibili in Figura 57 sono coerenti con le misurazioni del flusso di calore e delle temperature evidenziate precedentemente e mostrano come in circa un mese di monitoraggio la parete nuda disperda più energia rispetto a quella coperta da rivestimento vegetale. La differenza è di circa 1 kWh/m². La presenza del rivestimento infatti tende a mantenere le temperature superficiali esterne più alte rispetto alle corrispondenti sulla porzione nuda di parete. Questo fattore inevitabilmente riduce l'entità del flusso di calore uscente che per sua natura è in funzione della differenza tra la temperatura superficiale interna ed esterna.



a) b)
 Figura 56 – Andamento flussi di calore: a) periodo soleggiato; b) periodo nuvoloso

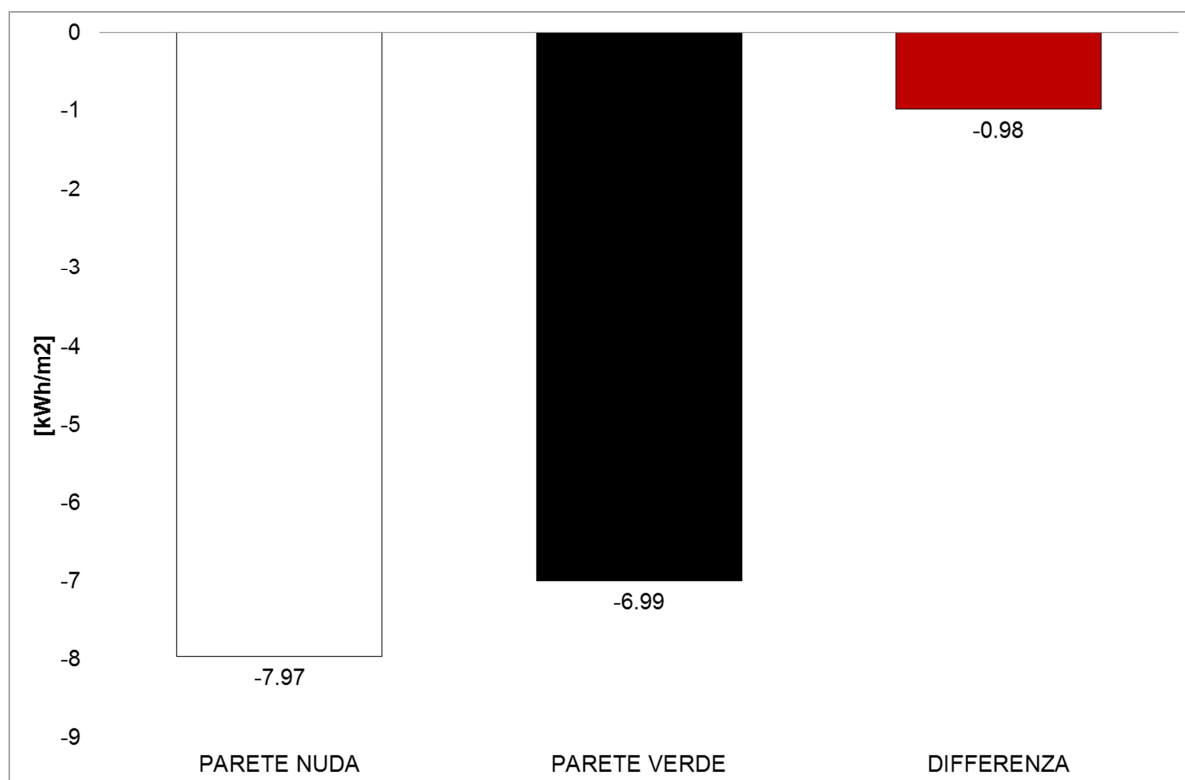


Figura 57 – Bilancio flussi periodo invernale

4.2.3. CONCLUSIONI MONITORAGGIO LW-GrCI

Il monitoraggio ha messo in evidenza alcune peculiarità tipiche dei rivestimenti vegetali, nella fattispecie *Living Walls*, applicati su pareti di edifici.

Per il periodo estivo di monitoraggio le prime considerazioni riguardano le temperature superficiali sia esterne che interne. Per le prime, sono emerse differenze di temperatura tra le superfici coperte da rivestimento vegetale e quelle nude fino a circa 14°C durante giornate soleggiate. Tale differenza si riduce notevolmente durante giornate meno soleggiate fino ad arrivare ad 1°C-2°C. Per le seconde, le differenze sono minime, ma comunque è possibile riscontrare, durante giornate soleggiate, valori più alti di temperatura sulle superfici in corrispondenza della parete nuda fino a 0.5°C rispetto a quelli riscontrati sulle pareti in corrispondenza dell'installazione di Living Wall.

Ulteriori considerazioni sono state effettuate sui flussi di calore durante il periodo estivo. È emerso che in corrispondenza della parete nuda i flussi di calore entranti nell'ambiente adiacente sono risultati maggiori. A parità di temperatura interna infatti, le temperature superficiali interne della parete in corrispondenza del Living Wall sono più basse.

Inoltre è stato effettuato un bilancio complessivo dell'energia entrante ed uscente dall'ambiente durante i mesi estivi. Nell'arco della durata complessiva del periodo di monitoraggio, circa 2 mesi, l'energia in ingresso in corrispondenza della parete nuda è risultata circa 11 volte maggiore rispetto a quella entrata in corrispondenza della parete vegetale. Tale riduzione del carico termico è di notevole importanza ai fini del contenimento dei consumi energetici di raffrescamento.

Il comportamento del Living Wall durante il periodo invernale è abbastanza chiaro e i dati raccolti in circa un mese di rilevazioni confermano un andamento costante e coerente con le aspettative.

In termini di temperature superficiali, la differenza di temperatura tra le due sonde poste in corrispondenza della superficie esterna dietro al rivestimento e sulla parete nuda libera da ostruzioni arriva a valori fino a 10°C in giornate soleggiate a testimonianza del fatto che il rivestimento vegetale, da una parte ostacola la radiazione solare, ma dall'altra garantisce una protezione durante le ore più fredde notturne con il risultato di mantenere le temperature superficiali più alte rispetto a porzioni di parete non ricoperte. Analizzando i flussi di calore è emerso che in corrispondenza del rivestimento vegetale i flussi di calore uscenti dalla parete che delimita l'ambiente retrostante dall'esterno sono costantemente inferiori salvo qualche breve periodo e tale differenza può arrivare a valori di circa 6 W/m² in giornate poco soleggiate.

In un'ottica di bilancio globale, il totale del flusso di calore uscente dalla parete nuda, in circa un mese di rilevazioni, è intorno a 8 kWh/m² mentre quello uscente dalla porzione di parete dietro il rivestimento vegetale è intorno a 7 kWh/m². La differenza dovuta alla presenza del rivestimento vegetale è di circa 1 kWh/m² mese. I valori espressi sono relativi solo al contesto di monitoraggio descritto e sono in funzione di molteplici variabili tra cui la temperatura esterna, la radiazione solare e la temperatura dell'ambiente interno che in occasione del rilievo microclimatico è stata mantenuta il più possibile costante ed intorno ai 20°C – 21°C circa.

5. MODELLO NUMERICO

In questo capitolo verrà descritto un modello numerico sviluppato nel corso dell'attività di ricerca e mirato alla simulazione del comportamento termofisico dei *Living Walls*. Nella prima parte del capitolo viene descritto il modello matematico per la porzione di parete non ricoperta dal rivestimento vegetale. L'obiettivo di questa prima parte è quello di verificare e affinare un modello relativamente semplice e conosciuto con i dati raccolti nelle due campagne di monitoraggio descritte al capitolo 4. Nella seconda parte del capitolo verrà invece descritto il modello numerico creato per i *Living Walls* e la sua validazione attraverso i dati raccolti. L'obiettivo della modellazione effettuata consiste nel poter estendere, in futuro, le considerazioni e le valutazioni energetiche a differenti località con differenti stratigrafie ed orientamenti.

5.1. MODELLO NUMERICO PARETE NUDA

L'approccio di modellazione utilizzato per lo sviluppo del modello matematico è quello a *volumi finiti* (Bonacina et al. 1989). Per gli scambi di calore per conduzione viene considerato il caso monodimensionale, per il quale, senza considerare generazione interna di calore, l'equazione generale di Fourier per la conduzione si scrive:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} \quad (19)$$

L'equazione (19) verrà sostituita con la corrispondente discretizzazione numerica.

Gli scambi per convezione e irraggiamento sul lato interno ed esterno della parete verranno inizialmente considerati attraverso i convenzionali coefficienti di resistenza superficiale espressi dalla (UNI EN ISO 6946 2008).

La prima parete analizzata è quella monitorata nella prima campagna di misura effettuata tra il 2011 e il 2012. La stratigrafia è riportata in Tabella 5.

Tabella 5 – Stratigrafia parete nuda

STRATO	SPESSORE	CONDUCIBILITA'	DENSITA'	CALORE SPECIFICO
	[m]	[W/m K]	[kg/m ³]	[J/Kg K]
Intonaco interno di calce e cemento	0,015	0,9	1800	850
Cls in argilla espansa	0,37	0,7	1600	850
Intonaco esterno di calce e cemento	0,015	0,9	1800	850

Il modello numerico prevede la suddivisione in nodi ognuno dei quali è rappresentativo di uno spazio finito. Per ogni nodo verrà scritto il bilancio termico assumendo che la somma dei flussi termici interessanti il nodo stesso sia pari all'energia termica immagazzinata dal singolo volume materico nel medesimo periodo di simulazione. La suddivisione in nodi è riportata in Figura 58. In particolare la parete nuda è stata suddivisa in 7 nodi termici.

Lo strato di intonaco interno, di spessore molto piccolo e soggetto a scarse variazioni di temperatura, non è stato suddiviso in ulteriori nodi, ma sono stati considerati solo i nodi alle estremità degli strati stessi. Per l'intonaco esterno, invece, è stata effettuata una suddivisione dello strato in due parti, corrispondenti a 3 nodi, per rendere il nodo più sensibile alla sollecitazione solare. Lo strato piano in blocchi di cls in argilla espansa è stato suddiviso in 3 intervalli corrispondenti a 4 nodi.

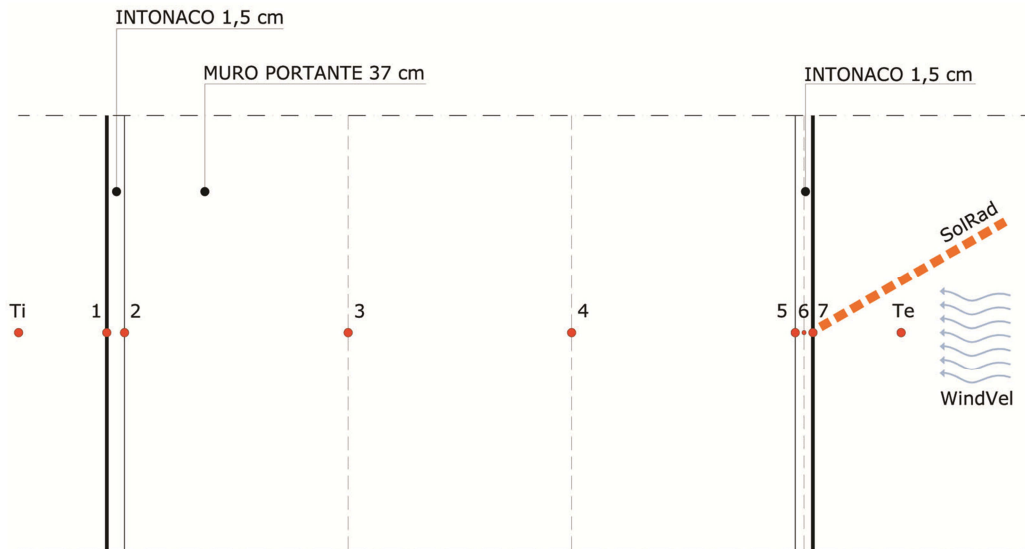


Figura 58 – Schema di discretizzazione della parete nuda

È possibile scrivere per ogni nodo i -esimo il bilancio termico nell'intervallo di tempo $\Delta\tau$. Si ha pertanto per ogni nodo un'equazione che consente di calcolare, in forma implicita, la temperatura all'istante τ , noti i valori della temperatura all'istante τ nei nodi adiacenti e all'istante $\tau - \Delta\tau$ nel nodo i -esimo stesso, in questo modo è quindi possibile determinare l'evoluzione nel tempo della temperatura nel dominio in esame. Questo metodo di procedere è chiamato *metodo iterativo implicito*.

Di seguito vengono indicati i bilanci su ogni nodo e la relativa esplicitazione della temperatura all'istante τ per il medesimo nodo:

$$\text{NODO 1} \quad \frac{\rho_1 \cdot c_1 \cdot \frac{s_1}{2} \cdot (\theta_1 - \theta_1^0)}{\Delta\tau} = h_i \cdot (\theta_i - \theta_1) + \frac{\lambda_1}{s_1} \cdot (\theta_2 - \theta_1) \quad (20)$$

$$\text{esplicitazione} \quad \theta_1 = \frac{a_1 \theta_1^0 + h_1 \theta_i + \frac{\lambda_1}{s_1} \theta_2}{a_1 + h_1 + \frac{\lambda_1}{s_1}} \quad \text{con } a_1 = \frac{\rho_1 \cdot c_1 \cdot \frac{s_1}{2}}{\Delta\tau} \quad (21)$$

$$\text{NODO 2} \quad \frac{(\rho_1 \cdot c_1 \cdot \frac{s_1}{2} + \rho_2 \cdot c_2 \cdot \frac{s_2}{6}) (\theta_2 - \theta_2^0)}{\Delta\tau} = \frac{\lambda_1}{s_1} \cdot (\theta_1 - \theta_2) + \frac{\lambda_2}{\frac{s_2}{3}} \cdot (\theta_3 - \theta_2) \quad (22)$$

$$\text{esplicitazione} \quad \theta_2 = \frac{a_2 \theta_2^0 + \frac{\lambda_1}{s_1} \theta_1 + \frac{\lambda_2}{\frac{s_2}{3}} \theta_3}{a_2 + \frac{\lambda_1}{s_1} + \frac{\lambda_2}{\frac{s_2}{3}}} \quad \text{con } a_2 = \frac{(\rho_1 \cdot c_1 \cdot \frac{s_1}{2} + \rho_2 \cdot c_2 \cdot \frac{s_2}{6})}{\Delta\tau} \quad (23)$$

$$\text{NODO 3} \quad \frac{\rho_2 \cdot c_2 \cdot \frac{s_2}{3} (\theta_3 - \theta_3^0)}{\Delta\tau} = \frac{\lambda_2}{\frac{s_2}{3}} (\theta_2 - \theta_3) + \frac{\lambda_2}{\frac{s_2}{3}} (\theta_4 - \theta_3) \quad (24)$$

$$\text{esplicitazione} \quad \theta_3 = \frac{a_3 \theta_3^0 + \frac{\lambda_2}{\frac{s_2}{3}} \theta_2 + \frac{\lambda_2}{\frac{s_2}{3}} \theta_4}{a_3 + \frac{\lambda_2}{\frac{s_2}{3}} + \frac{\lambda_2}{\frac{s_2}{3}}} \quad \text{con } a_3 = \frac{\rho_2 \cdot c_2 \cdot \frac{s_2}{3}}{\Delta\tau} \quad (25)$$

$$\text{NODO 4} \quad \frac{\rho_2 c_2 \frac{s_2}{3} (\theta_4 - \theta_4^0)}{\Delta\tau} = \frac{\lambda_2}{\frac{s_2}{3}} \cdot (\theta_3 - \theta_4) + \frac{\lambda_2}{\frac{s_2}{3}} \cdot (\theta_5 - \theta_4) \quad (26)$$

$$\text{esplicitazione} \quad \theta_4 = \frac{a_4 \theta_4^0 + \frac{\lambda_2}{\frac{s_2}{3}} \theta_3 + \frac{\lambda_2}{\frac{s_2}{3}} \theta_5}{a_4 + \frac{\lambda_2}{\frac{s_2}{3}} + \frac{\lambda_2}{\frac{s_2}{3}}} \quad \text{con } a_4 = \frac{\rho_2 \cdot c_2 \cdot \frac{s_2}{3}}{\Delta\tau} \quad (27)$$

$$\text{NODO 5} \quad \frac{(\rho_2 \cdot c_2 \cdot \frac{s_2}{6} + \rho_3 \cdot c_3 \cdot \frac{s_3}{4}) \cdot (\theta_5 - \theta_5^0)}{\Delta\tau} = \frac{\lambda_2}{\frac{s_2}{3}} \cdot (\theta_4 - \theta_5) + \frac{\lambda_3}{\frac{s_3}{2}} \cdot (\theta_6 - \theta_5) \quad (28)$$

$$\text{esplicitazione} \quad \theta_5 = \frac{a_5 \theta_5^0 + \frac{\lambda_2}{\frac{s_2}{3}} \theta_4 + \frac{\lambda_3}{\frac{s_3}{2}} \theta_6}{a_5 + \frac{\lambda_2}{\frac{s_2}{3}} + \frac{\lambda_3}{\frac{s_3}{2}}} \quad \text{con } a_5 = \frac{(\rho_2 \cdot c_2 \cdot \frac{s_2}{6} + \rho_3 \cdot c_3 \cdot \frac{s_3}{4})}{\Delta\tau} \quad (29)$$

$$\text{NODO 6} \quad \frac{\rho_3 \cdot c_3 \cdot \frac{s_3}{2} (\theta_6 - \theta_6^0)}{\Delta\tau} = \frac{\lambda_3}{\frac{s_3}{2}} \cdot (\theta_5 - \theta_6) + \frac{\lambda_3}{\frac{s_3}{2}} \cdot (\theta_7 - \theta_6) \quad (30)$$

$$\text{esplicitazione} \quad \theta_6 = \frac{a_6 \theta_6^0 + \frac{\lambda_3}{\frac{s_3}{2}} \theta_5 + \frac{\lambda_3}{\frac{s_3}{2}} \theta_7}{a_6 + \frac{\lambda_3}{\frac{s_3}{2}} + \frac{\lambda_3}{\frac{s_3}{2}}} \quad \text{con } a_6 = \frac{\rho_3 \cdot c_3 \cdot \frac{s_3}{2}}{\Delta\tau} \quad (31)$$

$$\text{NODO 7} \quad \frac{\rho_3 c_3 \frac{s_3}{4} (\theta_7 - \theta_7^0)}{\Delta\tau} = \frac{\lambda_3}{\frac{s_3}{2}} (\theta_6 - \theta_7) + h_e (\theta_e - \theta_7) + \alpha \cdot rad_{sol} \quad (32)$$

$$\text{esplicitazione} \quad \theta_7 = \frac{a_7 \theta_7^0 + \frac{\lambda_3}{\frac{s_3}{2}} \theta_6 + h_7 \theta_e + \alpha \cdot rad}{a_7 + \frac{\lambda_3}{\frac{s_3}{2}} + h_7} \quad \text{con } a_7 = \frac{\rho_3 \cdot c_3 \cdot \frac{s_3}{4}}{\Delta\tau} \quad (33)$$

Le condizioni al contorno impostate per le variabili presenti nelle equazioni alle differenze finite sono state le seguenti:

- Temperatura aria interna [T_i]: valori monitorati
- Temperatura aria esterna [T_e]: valori monitorati

- Radiazione solare globale incidente sulla parete oggetto di studio [rad_{sol}]: valori monitorati
- Coefficiente di adduzione interno [h_i]: $8 \text{ W/m}^2 \text{ K}$
- Coefficiente di adduzione esterno [h_e]: $23 \text{ W/m}^2 \text{ K}$
- Coefficiente di assorbimento solare [α]: 0,55

5.2. VALIDAZIONE MODELLO NUMERICO PARETE NUDA

Dopo aver implementato il modello numerico in VBA (*Visual Basic For Applications*) riportato in APPENDICE A all'interno del codice del modello completo, si sono confrontati i dati misurati sul campo con i dati ottenuti dal modello numerico. Il confronto è stato effettuato tra i nodi 1 e 7 del modello matematico e i rispettivi punti di monitoraggio predisposti sul sito di misura e visibili in Figura 23. Il periodo di validazione riportato nei grafici successivi è di una settimana, dal 15/08/2011 al 23/08/2011.

La corrispondenza tra i valori simulati e misurati è stata valutata per la temperatura superficiale e per il flusso di calore. In Figura 59 è riportata la corrispondenza per le temperature superficiali del nodo 1 (Figura 59a) e del nodo 7 (Figura 59b).

La corrispondenza tra i valori simulati e i valori misurati risulta buona. Tuttavia, in corrispondenza dei picchi di massima radiazione solare negli orari pomeridiani, durante i quali la parete esposta ad Ovest è maggiormente sollecitata, la differenza tra i valori calcolati e misurati è maggiore e si attesta intorno ai $5 \text{ K} - 6 \text{ K}$ per le temperature superficiali esterne e intorno a $1 \text{ K} - 2 \text{ K}$ per le temperature superficiali interne. Queste ultime risultano praticamente corrispondenti, salvo il gap iniziale dovuto alla scelta, nel modello matematico, di una temperatura di primo tentativo non aderente alle condizioni reali. Come è possibile notare, però, il modello si assesta velocemente e le temperature superficiali interne si sovrappongono. La differenza tra le temperature sul lato esterno durante le ore notturne si riduce a $1 \text{ K} - 2 \text{ K}$.

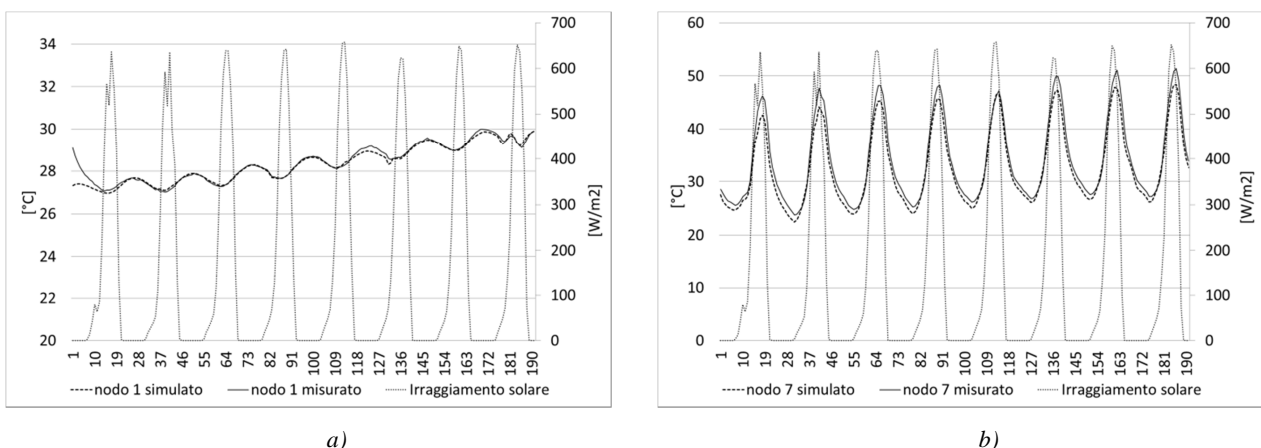


Figura 59 - Confronto temperature superficiali misurate e calcolate. a) nodo 1; b) nodo 7.

L'andamento del flusso di calore e la relazione tra i flussi calcolati e misurati è riportata in Figura 60.

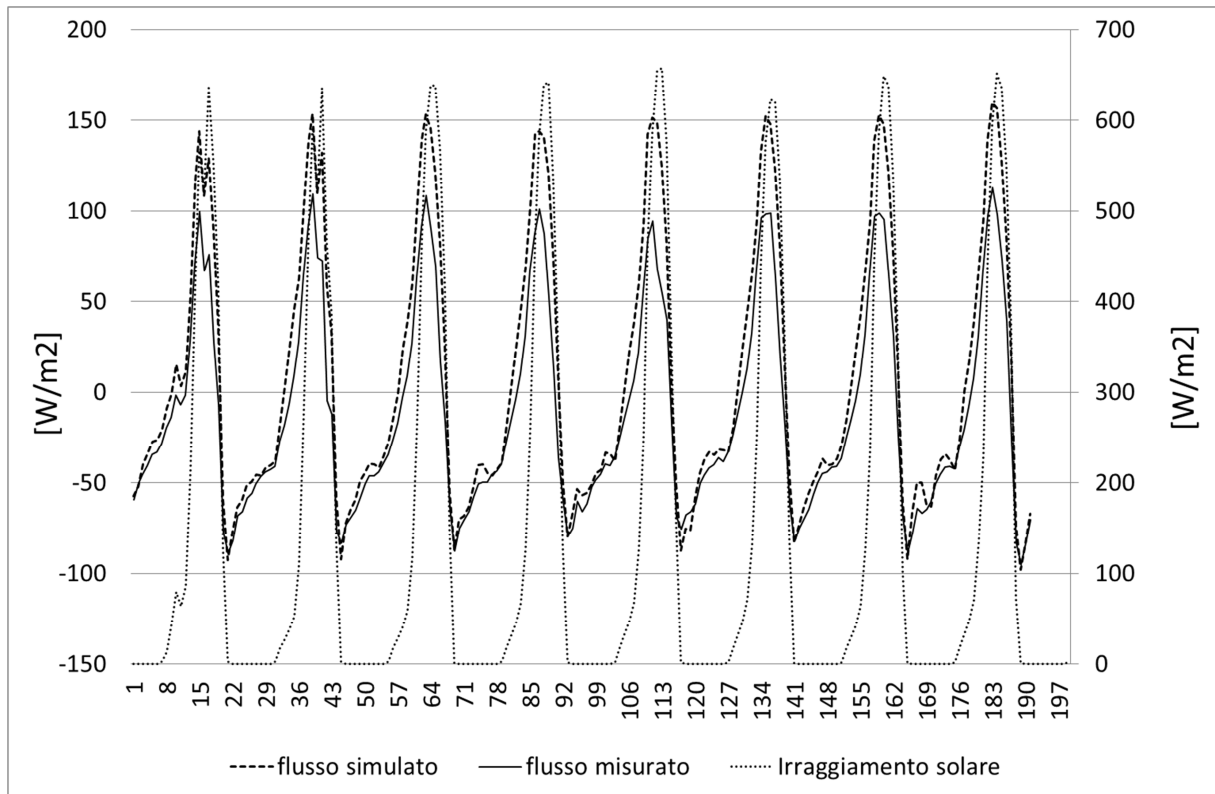
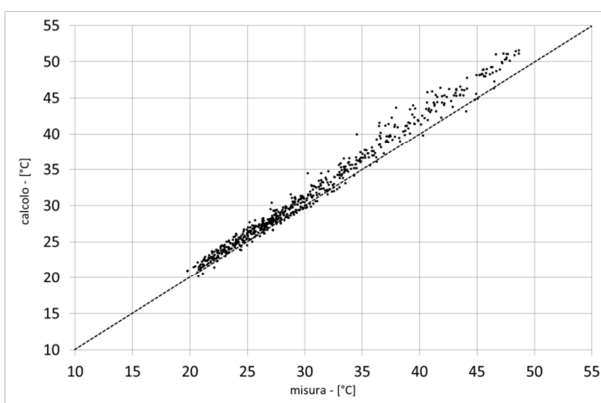
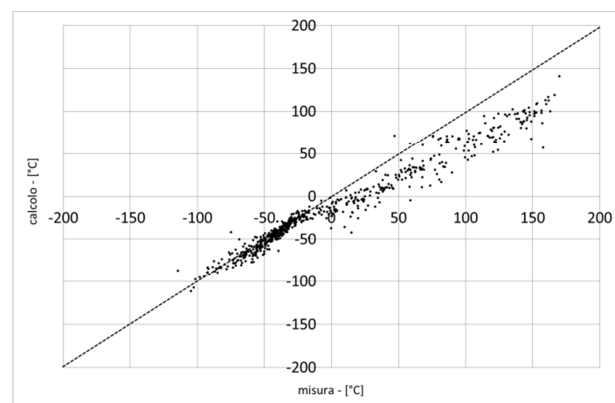


Figura 60 – Confronto flusso di calore su superficie esterna

Come è possibile notare, è presente una difficoltà del modello nel rappresentare i momenti di maggior irraggiamento come accade per il calcolo delle temperature superficiali. Tuttavia la differenza tra i valori calcolati e misurati non supera i $40 \text{ W/m}^2 - 50 \text{ W/m}^2$ e considerando un integrale giornaliero del flusso di calore si possono riscontrare differenze meno significative. Durante le ore notturne la differenza si riduce e si ha sovrapposizione tra i valori calcolati e misurati.



a)



b)

Figura 61 – Corrispondenza valori misurati e calcolati. a) temperatura nodo 7; b) flusso di calore nodo 7

In Figura 61 è riportata la corrispondenza tra i valori misurati e calcolati di temperatura e flusso di calore presso la superficie esterna. Come è possibile notare, la corrispondenza è buona per entrambi i parametri. Come già emerso dallo studio specifico su temperature e flussi, la correlazione tende a peggiorare in corrispondenza di valori elevati di irraggiamento solare.

5.3. MODELLO NUMERICO LIVING WALL

Successivamente alla creazione del modello di parete nuda descritto al capitolo 5.1, è stato predisposto il modello per lo studio del comportamento termico della parete nuda con la sovrapposizione del *Living Wall*. In Figura 62 è mostrata la discretizzazione adottata per il nuovo modello. Si può notare come siano stati aggiunti nuovi nodi termici rispetto al caso senza rivestimento. In particolare:

- nodo 8: nodo rappresentante l'intercapedine d'aria
- nodo 9 e 10: nodi rappresentanti lo strato di supporto del giardino verticale formato da Forex e feltro.
- nodo 11: nodo rappresentante le piante o il prato presenti nel giardino

Il modello è stato sviluppato per simulare il comportamento di entrambe le tipologie di *Living Wall* monitorate durante questo lavoro di ricerca: quella con giardino e intercapedine aperta (LW-GaOp) e quella con prato ed intercapedine chiusa (LW-GrCl). In Figura 63 è riportato uno schema dei due tipi di rivestimento.

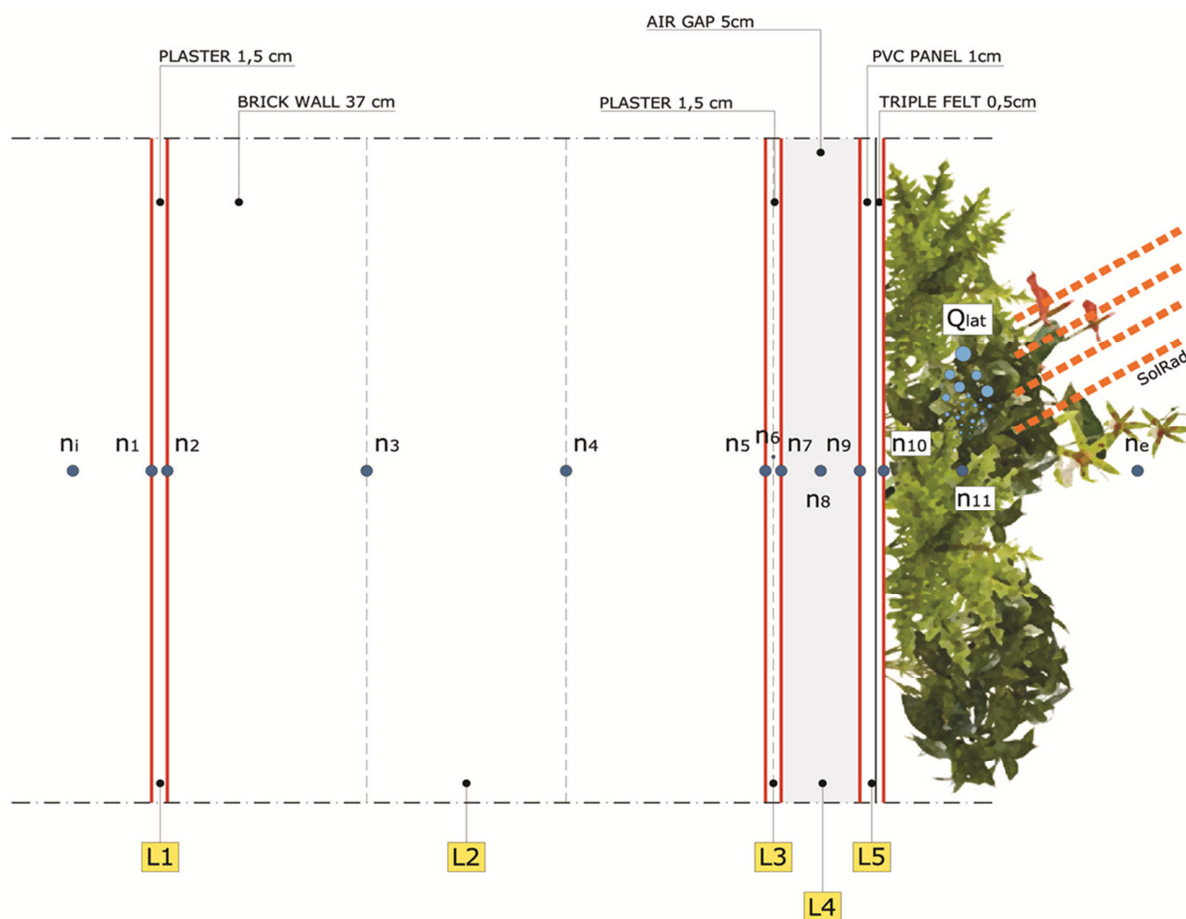


Figura 62 – Schema di discretizzazione della parete verde

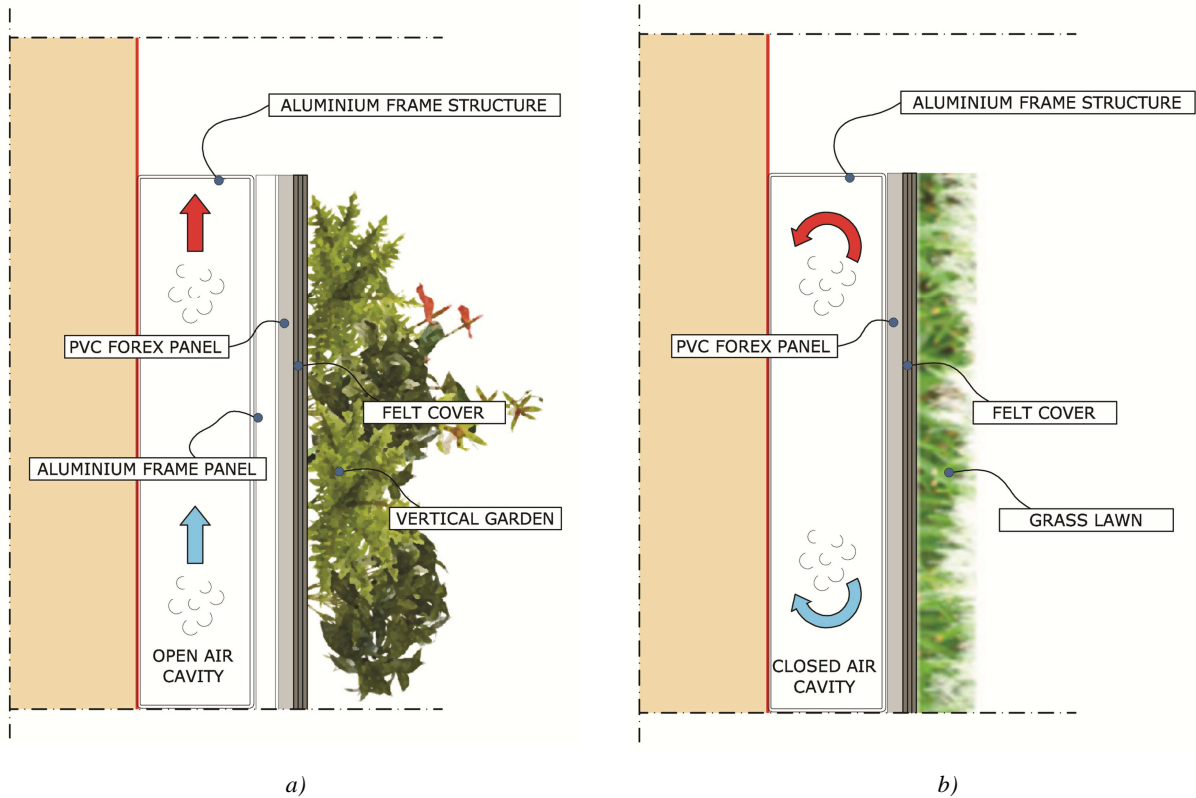


Figura 63 – Schema dei due tipi di Living Wall modellati. A) con giardino ed intercapedine aperta; b) con prato ed intercapedine chiusa.

Di seguito vengono riportati i bilanci termici calcolati per ogni nodo aggiuntivo rispetto alla parete standard già calcolata nei capitoli precedenti. In particolare per i nodi 7, 8 e 9, vengono riportate due equazioni, dovendo essi rappresentare i due casi oggetto di studio.

I nomi di tutte le grandezze espresse nelle equazioni e dei relative pedici sono riportati in Appendice B. Tuttavia è necessario fare alcune precisazioni:

- In tutte le equazioni il coefficiente h è calcolato a seconda del tipo di cavità come descritto nella sezione 3.1.3.
- Differenti valori di ε sono stati utilizzati per la simulazione considerando la differente emissività di piante, terreno, materiali edilizi e cielo.

$$\text{NODO 7} \quad \frac{\rho_3 \cdot c_3 \cdot \frac{s_3}{4} \cdot (\theta_7 - \theta_7^0)}{\Delta\tau} = h_7 \cdot \left(\frac{\theta_8 + \theta_{\text{ext}}}{2} - \theta_7 \right) + \frac{\lambda_3}{\frac{s_3}{2}} \cdot (\theta_6 - \theta_7) + \frac{\sigma_n}{\frac{1}{\varepsilon_{w,7}} + \frac{1}{\varepsilon_{w,9}} - 1} \cdot T_m^3 \cdot \quad (34)$$

$$\text{LW-GaOp} \quad 4 \cdot (\theta_9 - \theta_7)$$

Con $h_7 = 4 + 4v$ secondo la (1)

NODO 7

$$\frac{\rho_3 \cdot c_3 \cdot \frac{s_3}{4} \cdot (\theta_7 - \theta_7^0)}{\Delta\tau} = h_7 \cdot (\theta_8 - \theta_7) + \frac{\lambda_3}{\frac{s_3}{2}} \cdot (\theta_6 - \theta_7) + \frac{\sigma_n}{\frac{1}{\varepsilon_{w,7}} + \frac{1}{\varepsilon_{w,9}} - 1} \cdot T_m^3 \cdot 4 \cdot$$

LW-GrCl

$$(\theta_9 - \theta_7)$$

Con $h_7 = Nu \frac{\lambda_{gas}}{s_{cavit\grave{a}}}$ secondo la (4)

NODO 8

$$S_4 \cdot v_{air} \cdot \rho_{air} \cdot c_{air} \cdot (\theta_8 - \theta_{ext}) / (H) = h_8 \cdot \left(\theta_7 - \frac{\theta_8 + \theta_{ext}}{2} \right) + h_8 \cdot$$

LW-GaOp

$$\left(\theta_9 - \frac{\theta_8 + \theta_{ext}}{2} \right)$$

Con $h_7 = 4 + 4v$ secondo la (1)

NODO 8

$$\theta_8 = \left(\frac{\theta_7 + \theta_9}{2} \right)$$

LW-GrCl

NODO 9

$$\frac{\rho_5 \cdot c_5 \cdot \frac{s_5}{2} \cdot (\theta_9 - \theta_9^0)}{\Delta\tau} = h_9 \cdot \left(\frac{\theta_{ext} + \theta_8}{2} - \theta_9 \right) + \frac{\lambda_5}{s_5} \cdot (\theta_{10} - \theta_9) + \frac{\sigma_n}{\frac{1}{\varepsilon_{w,9}} + \frac{1}{\varepsilon_{w,7}} - 1} \cdot T_m^3 \cdot$$

LW-GaOp

$$4 \cdot (\theta_7 - \theta_9)$$

Con $h_9 = 4 + 4v$ secondo la (1)

NODO 9

$$\frac{\rho_5 \cdot c_5 \cdot \frac{s_5}{2} \cdot (\theta_9 - \theta_9^0)}{\Delta\tau} = h_9 \cdot (\theta_8 - \theta_9) + \frac{\lambda_5}{s_5} \cdot (\theta_{10} - \theta_9) + \frac{\sigma_n}{\frac{1}{\varepsilon_{w,9}} + \frac{1}{\varepsilon_{w,7}} - 1} \cdot T_m^3 \cdot 4 \cdot$$

LW-GrCl

$$(\theta_7 - \theta_9)$$

Con $h_9 = Nu \frac{\lambda_{gas}}{s_{cavit\grave{a}}}$ secondo la (4)

NODO 10

$$\frac{\rho_5 \cdot c_5 \cdot \frac{s_5}{2} \cdot (\theta_{10} - \theta_{10}^0)}{\Delta\tau} = \frac{\lambda_5}{s_5} \cdot (\theta_9 - \theta_{10}) + h_{10} \cdot (\theta_{ext} - \theta_{10}) + \alpha_{gr} \cdot rad_{sol} \cdot$$

$$\tau_{pl} + \sigma_n \cdot \varepsilon_{pl} \cdot T_{m,1}^3 \cdot 4 \cdot (\theta_{11} - \theta_{10}) \cdot f_{v,pl} + \sigma_n \cdot \varepsilon_{sky} \cdot T_{m,2}^3 \cdot 4 \cdot$$

$$(\theta_{sky} - \theta_{10}) \cdot f_{v,sky} + \sigma_n \cdot \varepsilon_{gr} \cdot T_{m,3}^3 \cdot 4 \cdot (\theta_{gr} - \theta_{10}) \cdot f_{v,gr}$$

Con h_{10} stimato pari a $18 W/m^2 K$; α_{gr} = stimato pari a 0.7; $\varepsilon_{pl} =$

0.95 come riportato al paragrafo 3.1.4; $f_{v,pl} = 1$; $f_{v,sky} = 0.5$; $f_{v,gr} = 0.5$

come riportato al paragrafo 3.1.4; $\varepsilon_{gr} = 0.8$; $\varepsilon_{sky} = 1$

$$\begin{aligned}
 & \alpha_{pl} \cdot \text{rad}_{sol} + \text{LAI} \cdot h_{11} \cdot (\theta_{ext} - \theta_{11}) + \sigma_n \cdot \varepsilon_{pl} \cdot T_{m,1}^3 \cdot 4(\theta_{10} - \theta_{11}) \cdot f_{v,pl} \\
 \text{NODO 11} \quad & + \sigma_n \cdot \varepsilon_{sky} \cdot T_{m,2}^3 \cdot 4 \cdot (\theta_{sky} - \theta_{11}) \cdot f_{v,sky} + \sigma_n \cdot \varepsilon_{gr} \cdot T_{m,3}^3 \quad (41) \\
 & \cdot 4 \cdot (\theta_{gr} - \theta_{11}) \cdot f_{v,gr} = Q_{lat}
 \end{aligned}$$

Con LAI calcolato come descritto al paragrafo 3.4; Q_{lat} calcolato come descritto al paragrafo 3.3.

5.4. RISULTATI E VALIDAZIONE MODELLO NUMERICO LIVING WALL

I risultati del modello numerico sono stati confrontati con i rilievi effettuati durante le campagne di monitoraggio. Il confronto è stato eseguito, come per la parete nuda, sui nodi termici 1 e 7, con riferimento alla Figura 62. In particolare sono stati confrontati i seguenti parametri:

- LW-GaOp: temperatura superficiale e flusso di calore presso il nodo 7
- LW-GrCl: temperatura superficiale presso il nodo 7 e flusso di calore presso il nodo 1

Il nodo 7 è stato considerato il più rappresentativo del modello numerico anche per la sua diretta corrispondenza con il nodo della temperatura superficiale esterna di una parete nuda.

Di seguito verrà proposta la validazione per entrambi i tipi di *Living Wall* e per entrambe le stagioni di monitoraggio, nel corso delle quali verrà identificata la settimana più significativa.

5.4.1. RISULTATI LW-GaOp

La prima parte dell'analisi dei risultati riguarda il comportamento termico del LW-GaOp durante il periodo estivo, in particolare durante una settimana del mese di Agosto, considerata rappresentativa delle condizioni climatiche tipiche estive.

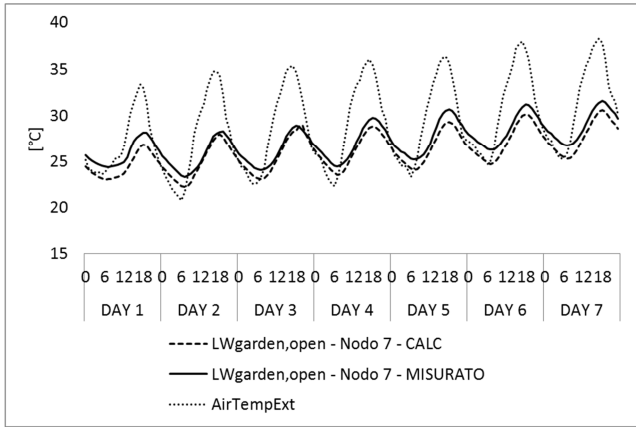
In Figura 64a è mostrato l'andamento delle temperature superficiali sul nodo 7. Com'è possibile notare, la corrispondenza è buona e la differenza tra il valore di temperatura superficiale misurato e quello calcolato dal modello non supera mai 1 K. La buona corrispondenza è dimostrata anche dal grafico di correlazione mostrato in Figura 64b.

Per quanto riguarda l'analisi del flusso di calore presso il nodo 7, i risultati sono mostrati in Figura 64c e Figura 64d. La corrispondenza tra valori calcolati e misurati mostra una differenza massima intorno a 9 W/m² durante le ore notturne. Diversamente dal caso di parete nuda, le ore caratterizzate da forte radiazione solare mostrano differenze più piccole tra valori calcolati e misurati. Si ricorda che, per la convenzione acquisita, un valore positivo del flusso di calore indica un flusso entrante nell'ambiente interno.

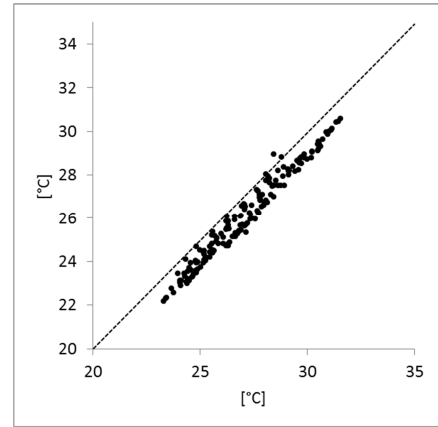
Gli andamenti simulati durante il periodo invernale, nel corso di una settimana di Dicembre, mostrano una corrispondenza tra i valori calcolati dal modello e i valori misurati sul campo simile a quella estiva, con differenze maggiori durante periodi di intenso irraggiamento. Tutte le corrispondenze sono mostrate dalla Figura 64e alla Figura 64h. Anche in questo caso la differenza si attesta per la temperatura superficiale attorno a 1 K e per il flusso di calore attorno a 12.5 W/m^2 .

Da un punto di vista generale il modello sviluppato per questa tipologia di *Living Wall* mostra variazioni della temperatura superficiale leggermente più ampie rispetto ai dati misurati con differenze che possono arrivare a 0.5 K e un andamento del flusso di calore meno accentuato sia durante il periodo estivo che durante il periodo invernale. Durante l'estate, ad esempio, il flusso uscente misurato arriva a valori di -16 W/m^2 contro i -6 W/m^2 del flusso calcolato. Tuttavia le differenze per quel che riguarda la temperatura superficiale non superando 1 K e possono essere quindi considerate più che accettabili. Sul fronte del flusso di calore le differenze sono, come riportato, maggiori, ma considerando un integrale giornaliero la differenza risulta trascurabile.

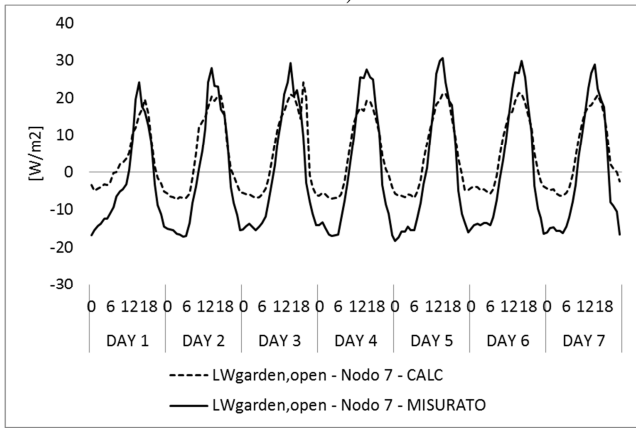
In seguito verranno calcolati alcuni indici di efficienza del modello numerico per poter valutare l'effettiva validità dei risultati anche da un punto di vista statistico.



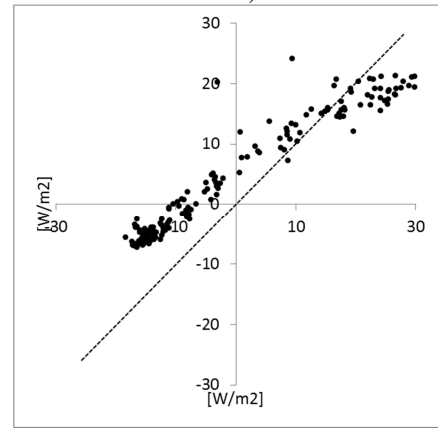
a)



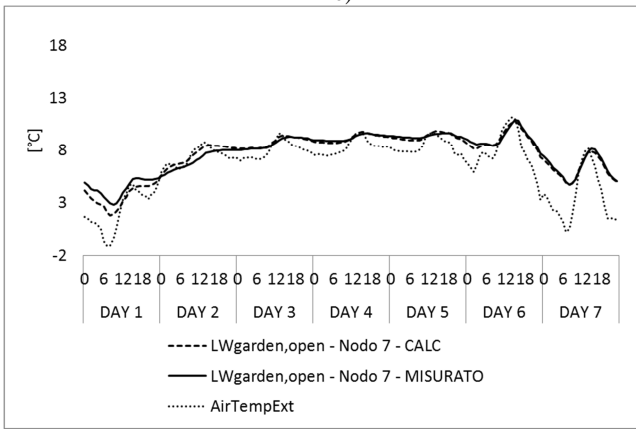
b)



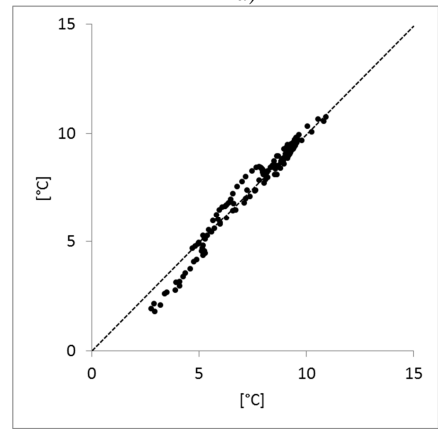
c)



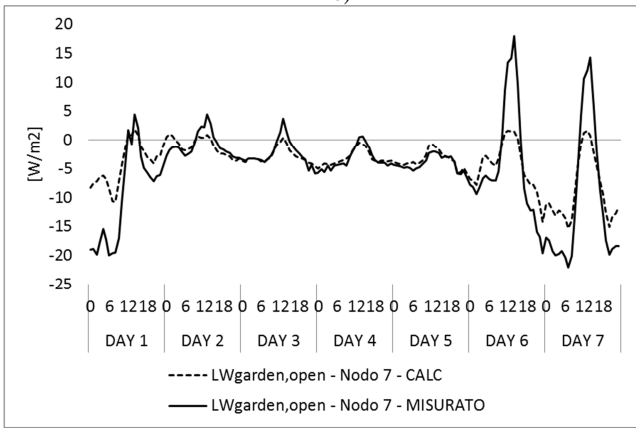
d)



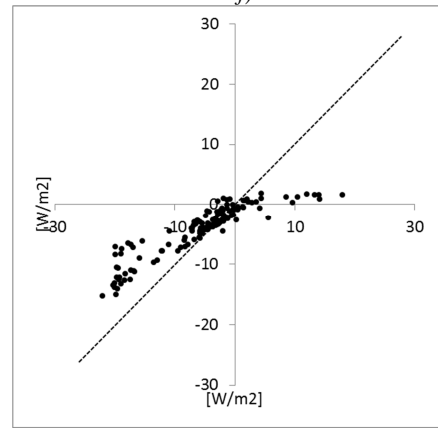
e)



f)



g)



h)

Figura 64 – LW-GaOp. a,b,c,d) settimana estiva; e,f,g,h) settimana invernale

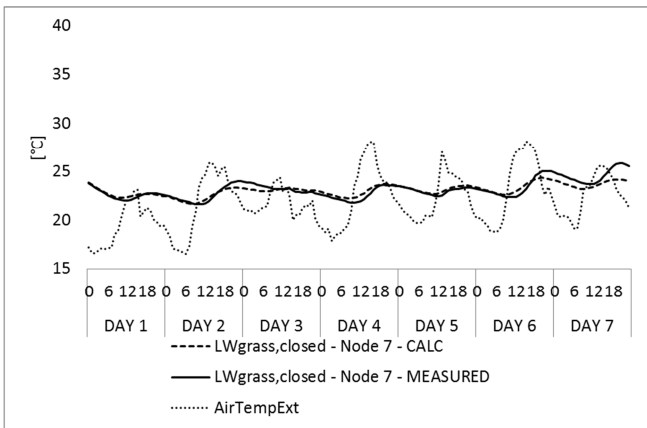
5.4.2. RISULTATI LW-GrCl

L'analisi dei risultati e la validazione del modello per la seconda tipologia di *Living Wall* monitorato (LW-GrCl), ha seguito la stessa procedura utilizzata per la prima tipologia. In una prima fase si è effettuata la comparazione tra i valori delle temperature superficiali ottenute tramite modellazione numerica e i valori ottenuti dalla misurazione sul campo. I risultati sono mostrati in Figura 65.

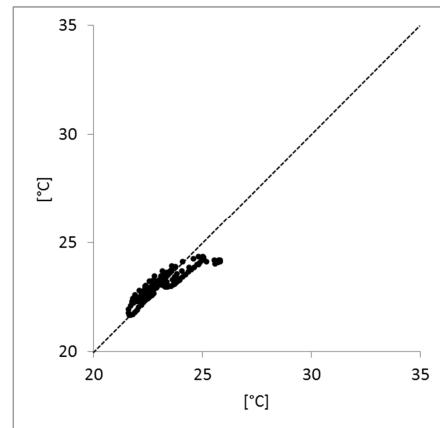
Per l'analisi della corrispondenza durante il periodo estivo si è presa in considerazione una settimana ritenuta significativa perché rappresentativa delle condizioni tipiche estive. La corrispondenza delle temperature superficiali presso il nodo 7 è mostrata in Figura 65a e Figura 65b. I risultati sono buoni e l'andamento, in termini di fluttuazione generale, mostra come i valori calcolati dal modello siano allineati a quelli misurati, come riportato nel grafico di correlazione. Anche la previsione dei flussi di calore calcolati sul nodo 1 mostra una buona corrispondenza come mostrato in Figura 65c e Figura 65d. La differenza tra valori calcolati e misurati della temperatura superficiale non supera valori di 0.6 K. Il flusso di calore registra le differenze maggiori, pari a circa 3 W/m^2 , durante le fasi di inversione di direzione.

Il periodo invernale è stato analizzato durante una settimana di Gennaio. Anche durante tale periodo la corrispondenza tra valori calcolati e misurati è buona come mostrato da Figura 65e a Figura 65h. Qualche incongruenza si può notare nell'ultimo grafico legato all'andamento del flusso di calore. In questo caso, probabilmente, un ruolo importante è giocato dal posizionamento della strumentazione che è risultata molto sensibile all'interferenza con le persone presenti all'interno dell'ambiente monitorato. Quantificando le differenze di temperatura tra valori calcolati e misurati si può notare come in alcuni casi il modello sottostimi la temperatura superficiale con differenze di circa 1 K rispetto ai valori misurati.

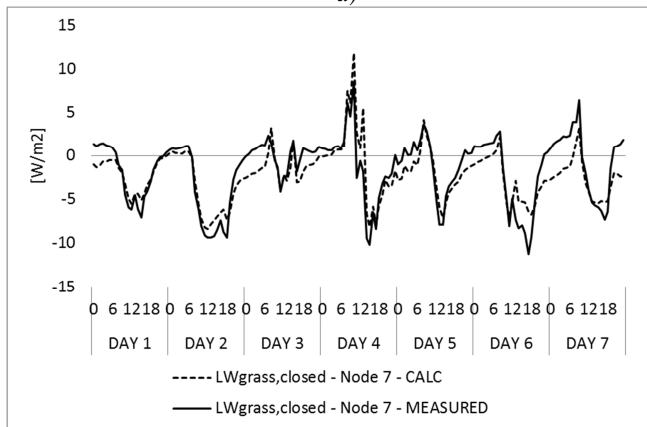
In generale, il modello sviluppato per il LW-GrCl mostra ottimi risultati e minori differenze con i valori misurati rispetto al modello per il LW-GaOp. A differenza del primo caso, il modello mostra minori oscillazioni dei valori di temperatura se confrontato con i valori misurati, specialmente durante il periodo invernale.



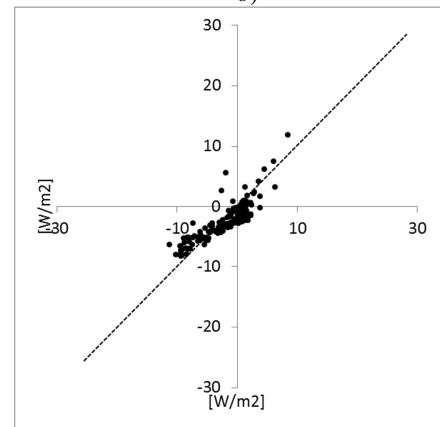
a)



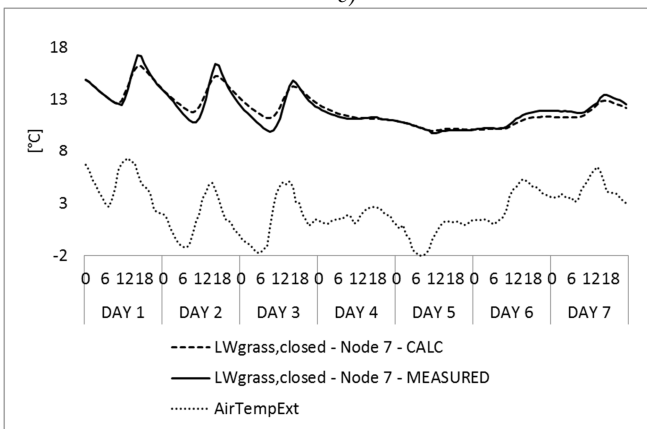
b)



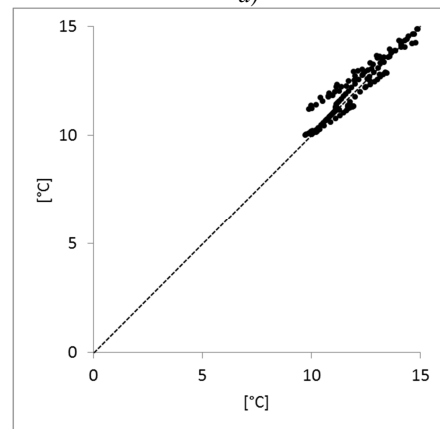
c)



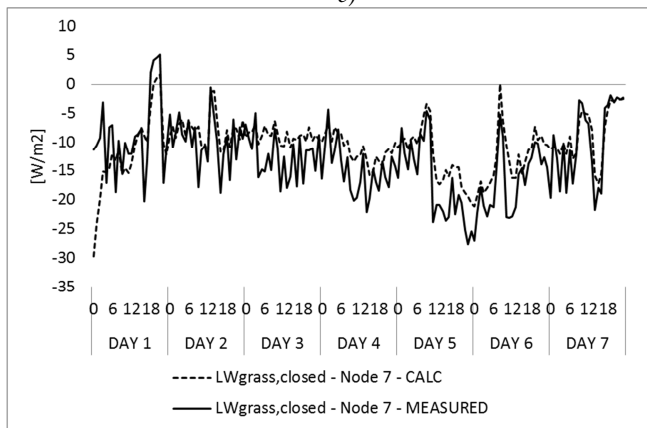
d)



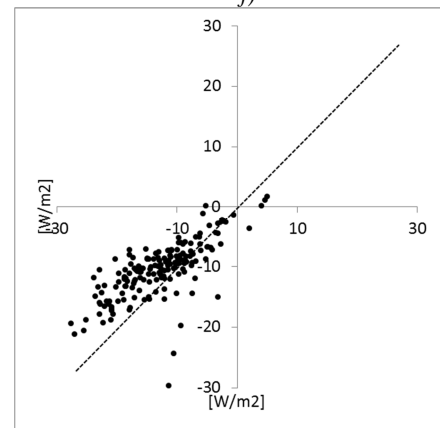
e)



f)



g)



h)

Figura 65 – LW-GrCl. a,b,c,d) settimana estiva; e,f,g,h) settimana invernale

5.4.3. VALIDAZIONE STATISTICA DEL MODELLO DI LIVING WALL

La validazione del modello è stata effettuata anche tramite specifici indici di valutazione utili per la verifica dell'accuratezza del modello (**Jim and He 2011**): RMSE (Root Mean Square Error) e NSEC (Nash–Sutcliffe Efficiency Coefficient) (**Nash and Sutcliffe 1970**).

RMSE è utilizzato molto frequentemente per testare l'affidabilità di previsione di un modello e per quantificare le differenze tra valori misurati e calcolati di particolari fenomeni fisici. Il valore di RMSE viene calcolato con la seguente espressione:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (Value_{observed}^t - Value_{simulated}^t)^2} \quad (42)$$

L'indice NSEC calcola l'efficienza del modello secondo la seguente espressione

$$E = 1 - \frac{\sum_{t=1}^n (Value_{observed}^t - Value_{simulated}^t)^2}{\sum_{t=1}^n (Value_{observed}^t - \bar{Value}_{observed})^2} \quad (43)$$

Un valore di E uguale a 1 significa una perfetta corrispondenza tra valori simulati e valori reali, mentre un valore di E uguale a 0 indica una scarsa validità del modello la cui accuratezza è paragonabile a quella fornita dal valore medio dei risultati. Un valore di E negativo indica che il modello non è affidabile e che il valor medio è più affidabile del modello. In altre parole più il valore dell'indice NSEC è vicino ad 1 più il modello è in grado di riprodurre il comportamento reale della variabile analizzata.

Un confronto tra gli indici RMSE e NSEC dei due modelli di *Living Wall* in entrambe le stagioni, è mostrato in Tabella 6.

Tabella 6 – Indici RMSE e NSEC per entrambi i modelli di *Living Wall*, periodo di validazione e variabile monitorata

VARIABILE ANALIZZATA	RMSE	NSEC
LW-GaOp – Summer – Temperature	1.1	0.7
LW-GaOp – Summer – Heat Flux	8.0	0.7
LW-GaOp – Winter – Temperature	0.4	1.0
LW-GaOp – Winter – Heat Flux	4.5	0.6
LW-GrCl – Summer – Temperature	0.5	0.7
LW-GrCl – Summer – Heat Flux	2.0	0.7
LW-GrCl – Winter – Temperature	0.5	0.9
LW-GrCl – Winter – Heat Flux	5.0	0.4

5.5. CONCLUSIONI

In questo capitolo si è sviluppato un modello matematico per la caratterizzazione dei rivestimenti vegetali. Il modello è stato validato sia in condizioni estive che invernali e considera, tra tutte le caratteristiche principali dei *Living Walls*, quelle ritenute più significative e in particolare:

- Indice di area fogliare (LAI)
- Coefficiente di convezione intra fogliare

- Calore latente di evapotraspirazione
- Emissività superfici muro
- Spessore e presenza intercapedine d'aria

Il processo di validazione mostra come il modello abbia una buona accuratezza dei risultati confermata dalla corrispondenza tra valori misurati e calcolati. Per confermare ulteriormente i risultati, sono stati utilizzati gli indici RMSE e NSEC il cui risultato ha confermato la bontà del modello. Si ritiene che i risultati raggiunti siano sufficienti per valutazioni energetiche globali e audit energetici. Tuttavia per valutazioni più accurate e in un dettaglio orario è necessario ottenere una maggior accuratezza.

6. ANALISI DI SENSITIVITA' SUL MODELLO NUMERICO

Ultimato il modello numerico si è ritenuto importante effettuare una analisi di sensitività rispetto alle principali variabili indipendenti. In questo capitolo si tratterà questo aspetto nel dettaglio per capire quali parametri risultino effettivamente significativi e influenti. In generale l'analisi di sensitività è utilizzata per indagare come le opzioni di scelta e le loro variazioni influenzino i risultati ottenibili da un modello numerico (**European Commission 2009**). Dapprima verranno identificate le variabili indipendenti, scelte tra quelle ritenute più significative, successivamente verranno scelte le variabili dipendenti su cui effettuare l'analisi di sensitività.

6.1. SCELTA VARIABILI INDIPENDENTI

La scelta delle variabili indipendenti per effettuare l'analisi di sensitività si è concentrata prevalentemente sui parametri che caratterizzano il Living Wall. In particolare, si sono scelte quelle variabili per le quali si è ritenuto elevato il rischio di incertezza nella determinazione del relativo valore. In questo senso le variabili scelte sono state:

- Indice di area fogliare (LAI)
- Coefficiente di convezione intra fogliare
- Calore latente di evapotraspirazione
- Emissività superfici muro
- Spessore intercapedine d'aria

Seguendo la traccia della metodologia *Design Of Experiment* (**Montgomery 2009**) si è scelto di modificare le variabili in modo da ottenere tre livelli di input per ogni variabile: un valore minimo, un valore medio e un valore massimo di variazione in un intorno ritenuto coerente con i valori conosciuti. In Tabella 7 vengono riportati i valori assunti dalle variabili nei tre livelli di input.

Tabella 7 – Livelli di input utilizzati per le variabili nell'analisi di sensitività

	Basso	Medio	Alto
LAI [m^2/m^2]	2	4	6
Coefficiente di convezione intra fogliare [$W/m^2 K$]	11	18	25
Calore latente di evapotraspirazione [W/m^2]	15	42	70
Emissività superfici muro [-]	0.1	0.5	0.9
Spessore intercapedine d'aria [m]	0.01	0.05	0.1

Per ogni parametro la variazione è stata eseguita secondo i seguenti criteri:

- Indice LAI: si è ritenuto opportuno variare il LAI da un valore minimo di 2 ad un valore massimo di 6. Tali valori corrispondono a diversi tipi di vegetazione e a diversi livelli di area fogliare e sono stati desunti effettuando delle aggregazioni qualitative a partire dai dati esposti nel lavoro di Chen (Chen 2006). Nel dettaglio, un LAI pari a 2 indica una copertura fogliare per foglie sparse senza particolari caratteristiche, un LAI pari a 4 indica una copertura fogliare media per piante ornamentali anche con fiori e un LAI pari a 6 indica una copertura fogliare elevata tipica di erba molto fitta o piante molto dense.

- Coefficiente di convezione intra fogliare: questo coefficiente è utilizzato nel modello numerico per esprimere lo scambio di calore per convezione tra le foglie e l'aria all'interno della vegetazione. In prima battuta la norma UNI EN ISO 6946 fornisce un valore di $25 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ oppure esprime il coefficiente in funzione delle velocità dell'aria. In questo caso, ipotizzando che la velocità dell'aria all'interno della vegetazione sia pressoché nulla è stato stimato un valore medio di $18 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$. Il valore massimo è stato mantenuto da normativa pari a $25 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ ed è stato scelto un valore minimo pari a $11 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$.
- Calore latente di evapotraspirazione: si è valutato che in un giorno invernale, con radiazione solare assente, la potenza rimossa per evapotraspirazione è pari a circa $15 \text{ W}/\text{m}^2$ come spiegato nel paragrafo 7.2.2. In un giorno estivo la potenza rimossa può arrivare a circa $70 \text{ W}/\text{m}^2$ e questo valore è stato tenuto come valore massimo per il calore rimosso attraverso il fenomeno dell'evapotraspirazione. Il valore medio è stato scelto pari a circa $42 \text{ W}/\text{m}^2$ come media tra i due valori precedenti.
- Emissività superfici muro: il valore standard per il parametro di emissività di tutti gli elementi costruttivi nel campo dell'edilizia è pari a 0.9. Tuttavia esistono rivestimenti basso emissivi di nuova generazione che possono ridurre il valore dell'emissività fino anche a 0.1. Il valore medio è stato scelto pari a 0.5 come media tra i due valori precedenti.
- Spessore intercapedine d'aria: lo spessore usualmente utilizzato per il montaggio dei Living Wall è pari a 0.05m. Questo valore è dato da una chiara esigenza costruttiva e riflette la dimensione standard dei montanti in alluminio utilizzati per il montaggio delle pareti vegetali. Tuttavia, per poter effettuare una analisi di sensitività su questo parametro, si sono ipotizzati anche uno spessore inferiore, pari a 0.02 m, ed uno spessore maggiore, più facilmente installabile, pari a 0.1 m.

6.2. SCELTA DELLE VARIABILI DIPENDENTI

La scelta dei parametri chiave per l'analisi di sensitività si è concentrata su una variabile fondamentale ritenuta tra le più significative per la valutazione del comportamento termofisico del Living Wall: la temperatura superficiale esterna dietro il rivestimento vegetale. Attraverso il valore di tale parametro, ritenuto anche di più diretta comprensione, è possibile derivare considerazioni di tipo energetico sul flusso di calore entrante/uscente dalla parete. Non è poi da sottovalutare l'escursione termica della temperatura superficiale esterna il cui effetto diretto influenza la durabilità dei materiali nel tempo.

Una ulteriore analisi di sensitività è stata condotta anche per il nodo termico rappresentante la temperatura superficiale interna, ma le minime variazioni riscontrate non giustificavano una dettagliata analisi dei risultati.

6.3. ANALISI DI SENSITIVITA'

Scelte le variabili indipendenti e dipendenti, è possibile effettuare l'analisi di sensitività. L'analisi è stata fatta sia per il periodo estivo che per il periodo invernale. I casi analizzati sono stati quello oggetto del presente lavoro e quindi Living Wall ad intercapedine chiusa ed aperta. Risultano quindi 4 casi per i quali è stata riportata la temperatura media giornaliera della superficie interna per tutte le variazioni delle variabili indipendenti. Le condizioni al contorno rimaste inalterate per l'analisi di sensitività, condotta per il giorno

medio estivo ed invernale, sono: la radiazione solare, la temperatura aria esterna, la velocità vento e l'umidità relativa.

Tali condizioni medie sono state ricavate dalla media dei valori di giorni contigui per il corrispondente periodo. La temperatura interna è stata considerata costante e pari a 21 °C e 26 °C rispettivamente per il giorno medio invernale ed estivo.

I risultati dell'analisi di sensitività per il giorno medio estivo sono riportati in Figura 66. Come è possibile notare nel caso di intercapedine chiusa (Figura 66a) le variabili più influenti sono il LAI, l'emissività delle pareti di muro ed il coefficiente di scambio convettivo tra la vegetazione; risultano invece ininfluenti lo spessore dell'intercapedine e il calore latente per evapotraspirazione. Le differenze raggiungono 0.3 K per variazioni di emissività e del coefficiente di scambio convettivo. Nel caso di intercapedine aperta (Figura 66b), l'unico parametro che influenza la temperatura superficiale della parete è lo spessore dell'intercapedine poiché interviene direttamente sullo scambio convettivo all'interno dell'intercapedine stessa. La variazione registrata è di circa 2 K.

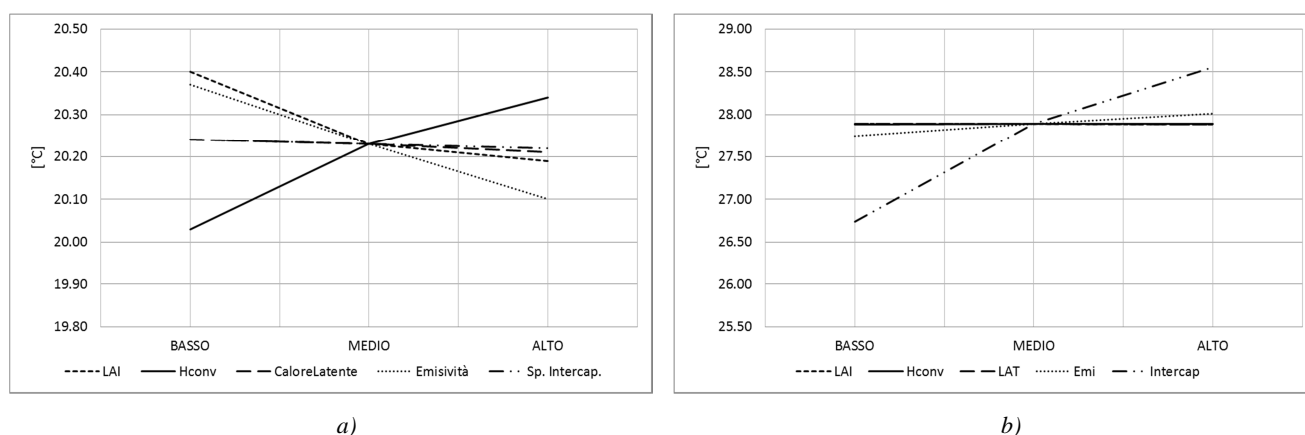


Figura 66 – Analisi di sensitività nel caso di giorno medio estivo. a) intercapedine chiusa; b) intercapedine aperta

I risultati dell'analisi di sensitività per il giorno medio invernale sono riportati in Figura 67. E' possibile notare una situazione molto simile al caso estivo: nel caso di intercapedine chiusa (Figura 67a), le variabili indipendenti maggiormente influenti sul valore di temperatura superficiale sono ancora una volta l'emissività e il coefficiente di scambio termico convettivo, meno influente è invece il LAI. In questo caso la differenza tra il caso minimo e massimo è nell'ordine dei 3 K. Nel caso di intercapedine aperta (Figura 67b), ancora una volta è lo spessore dell'intercapedine stessa a giocare il ruolo più importante tra tutte le variabili indipendenti, riuscendo a variare la temperatura superficiale di circa 1.5 K tra il caso minimo e massimo.

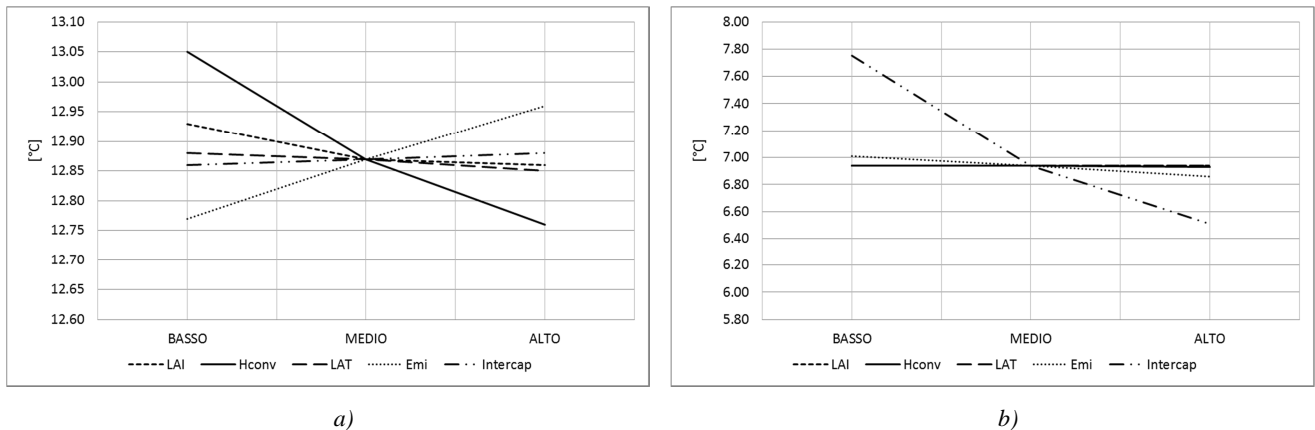


Figura 67 – Analisi di sensitività nel caso di giorno medio invernale. a) intercapedine chiusa; b) intercapedine aperta

In conclusione, le variabili più significative che riescono ad incidere maggiormente sulla temperatura superficiale esterna dietro il Living Wall, sono in entrambi i casi, estivo ed invernale, le seguenti:

- emissività: la temperatura superficiale non mostra variazioni oltre 0.3 K
- coefficiente di scambio termico convettivo esterno: la temperatura superficiale non mostra variazioni oltre 0.5 K nei casi di intercapedine chiusa
- spessore intercapedine: la temperatura superficiale mostra variazioni di circa 2 K nel caso di intercapedine aperta e di circa 1.2 K nei casi di intercapedine chiusa. Le variazioni riscontrate sono le più significative tra tutti i casi considerati.

7. TRASMITTANZA TERMICA DEI LIVING WALLS

A seguito della modellazione numerica a volumi finiti descritta nel capitolo 5, è stato possibile effettuare una stima della trasmittanza equivalente dell'intero elemento costruttivo formato dalla parete dell'edificio e dalla sovrapposizione su di esso dell'elemento vegetale, al fine di fornire al progettista che intende installare un tale sistema di rivestimento un utile parametro di valutazione energetica. In questo capitolo verrà dapprima effettuato un confronto dei risultati ottenuti calcolando la trasmittanza di una normale parete edilizia, sia secondo l'attuale normativa vigente (**UNI EN ISO 6946 2008**) che attraverso il modello numerico messo a punto nel presente lavoro e successivamente si effettuerà una stima della trasmittanza totale della parete con la giustapposizione del rivestimento vegetale nelle due versioni oggetto di studio.

Inizialmente, per poter comparare i valori calcolati da normativa con quelli stimati utilizzando il modello numerico, è stato necessario eliminare la forzante climatica legata alla radiazione solare, che è poi stata reintrodotta per una stima più accurata.

7.1. CONFRONTO TRASMITTANZA PARETE STANDARD

Una prima validazione è stata effettuata su alcune tipologie standard di parete edilizia. Le tipologie prese in considerazione sono 3 e vengono di seguito elencate con l'indicazione della stratigrafia dall'interno verso l'esterno e la relativa codifica:

- intonaco (P) – isolante (I) – muratura (M) – intonaco (P). Codifica: P-I-M-P
- intonaco (P) – muratura (M) – isolante (I) – intonaco (P). Codifica: P-M-I-P
- intonaco (P) – muratura (M) – intonaco (P). Codifica: P-M-P

i parametri termofisici e geometrici dei vari strati utilizzati per il calcolo della trasmittanza sono elencati in **Tabella 8**.

La norma (**UNI EN ISO 6946 2008**), stabilisce che il calcolo della trasmittanza termica venga effettuato secondo la seguente equazione:

$$U = \frac{1}{R_{tot}}$$

con R_{tot} calcolato come sommatoria di tutte le resistenze secondo la relazione:

$$R_{tot} = R_{si} + R_1 + R_2 + \dots + R_n + R_{se}$$

dove con $R_1 + R_2 + \dots + R_n$ vengono indicate le resistenze degli strati omogenei e con R_{si} ed R_{se} vengono indicate rispettivamente la resistenza superficiale interna ed esterna. La norma pone come valori di riferimento delle resistenze superficiali interne ed esterne i seguenti valori:

$$R_{si} = 0.13 \text{ (m}^2 \cdot \text{K)/W}$$

$$R_{se} = 0.04 \text{ (m}^2 \cdot \text{K)/W}$$

tali valori sono previsti per un elemento attraversato da flusso di calore orizzontale, trattandosi nel caso in esame di pareti verticali.

Tabella 8 – Parametri termofisici utilizzati per il calcolo della trasmittanza

	Conducibilità (W/mK)	Densità (kg/m ³)	Calore specifico (J/kg K)	Spessore (m)
P	0.9	1800	850	0.015
I	0.034	50	1250	0.10
M	0.68	1600	840	0.30

Le condizioni al contorno utilizzate per il calcolo della trasmittanza sono di seguito riportate:

- $T_{interna} = 1^{\circ}\text{C}$
- $T_{esterna} = 0^{\circ}\text{C}$
- Radiazione solare = 0 W/m²
- Umidità relativa = 0 %
- Velocità vento = 0 m/s

In regime stazionario il calcolo della trasmittanza per i pacchetti P-I-M-P e P-M-I-P non presenta alcuna differenza, ma in regime dinamico la differenza è sostanziale e il modello numerico sviluppato aiuterà a dimostrarlo.

7.2. STIMA TRASMITTANZA PACCHETTO PARETE - LIVING WALL

La presenza di un Living Wall sulla parete di un edificio comporta alcune sostanziali modifiche al comportamento termofisico della retrostante parete, come visto nei capitoli precedenti. Le principali alterazioni sul lato esterno dell'edificio possono essere riassunte nei seguenti punti:

- presenza di un'intercapedine d'aria ventilata o non ventilata
- giustapposizione di nuovi strati di materiale omogeneo
- elevato effetto schermante (in funzione del LAI)
- effetto evapotraspirativo

Si stimerà ora la trasmittanza dell'intero pacchetto formato da parete e giustapposizione di Living Wall. In una prima fase si effettuerà il calcolo ipotizzando di utilizzare le specifiche da normativa e in una seconda fase si stimerà il valore attraverso il modello numerico.

7.2.1. STIMA SEMPLIFICATA SECONDO UNI EN ISO 6946:2008

Delle principali alterazioni prodotte dall'installazione del rivestimento vegetale la normativa attuale è in grado di prendere in considerazione solo la presenza dell'intercapedine d'aria nelle due versioni, chiusa ed aperta, e la presenza di nuovi strati. La normativa non è in grado di considerare l'effetto di evapotraspirazione e non considera, nel calcolo della trasmittanza, la presenza della radiazione solare. Per quanto riguarda l'intercapedine d'aria la normativa considera la presenza di un'intercapedine e ne fornisce un valore di resistenza termica in funzione dello spessore e dell'ipotesi che essa possa essere non ventilata, debolmente ventilata o ben ventilata.

Nel caso di intercapedine *non ventilata* il valore di resistenza termica è pari a:

- $R_{aria} = 0.18$ ($m^2 K$)/W per spessore intercapedine di 50mm

Nel caso di intercapedine d'aria *ben ventilata* con area aperture > 1500 mm^2/m la normativa impone di non considerare la resistenza termica dello strato d'aria e di tutti gli strati tra il layer d'aria e lo strato esterno, ma di includere una resistenza superficiale esterna corrispondente ad aria ferma secondo l'Appendice A della normativa stessa oppure utilizzare lo stesso valore della resistenza interna.

Secondo quanto appena descritto la successione delle resistenze termiche, dall'interno verso l'esterno, delle due opzioni di Living Wall considerate nel presente lavoro è riportata in Tabella 9.

Tabella 9 – Resistenze termiche in ($m^2 K$)/W

INTERCAPEDINE NON VENTILATA		INTERCAPEDINE VENTILATA	
R_{si}	0.13	R_{si}	0.13
R_{parete}	in funzione dei casi	R_{parete}	in funzione dei casi
$R_{aria, non ventilata}$	0.18	R_{se}	0.13
$R_{supporto}$	0.42		
R_{se}	0.04		

Lo strato di supporto è considerato formato dal pannello in Forex e da un piccolo strato di terriccio che funge da iniziale substrato delle piante. La presenza delle piante non è stata considerata non essendo contemplata dalla normativa in vigore.

I risultati di questa prima valutazione vengono riportati in Figura 68. Nel grafico sono riportati i valori di trasmittanza dei 3 casi di semplice parete (W), parete con Living Wall e intercapedine aperta (W+LW VENT) e parete con Living Wall e intercapedine chiusa (W+LW NOT VENT) Come è possibile notare nei due casi con muratura isolata a cappotto interno o esterno, la differenza è abbastanza ridotta rispetto al caso standard e non supera il 3.5% nel caso di intercapedine ventilata, mentre è più significativa e si attesta intorno al 15% nel caso di intercapedine chiusa. Un caso particolare è invece la parete senza isolamento, in cui tutto si amplifica a causa del basso valore di trasmittanza originario. Il caso con intercapedine aperta riduce la trasmittanza di circa il 12% mentre il caso con intercapedine chiusa riduce il valore di trasmittanza fino al 48%.

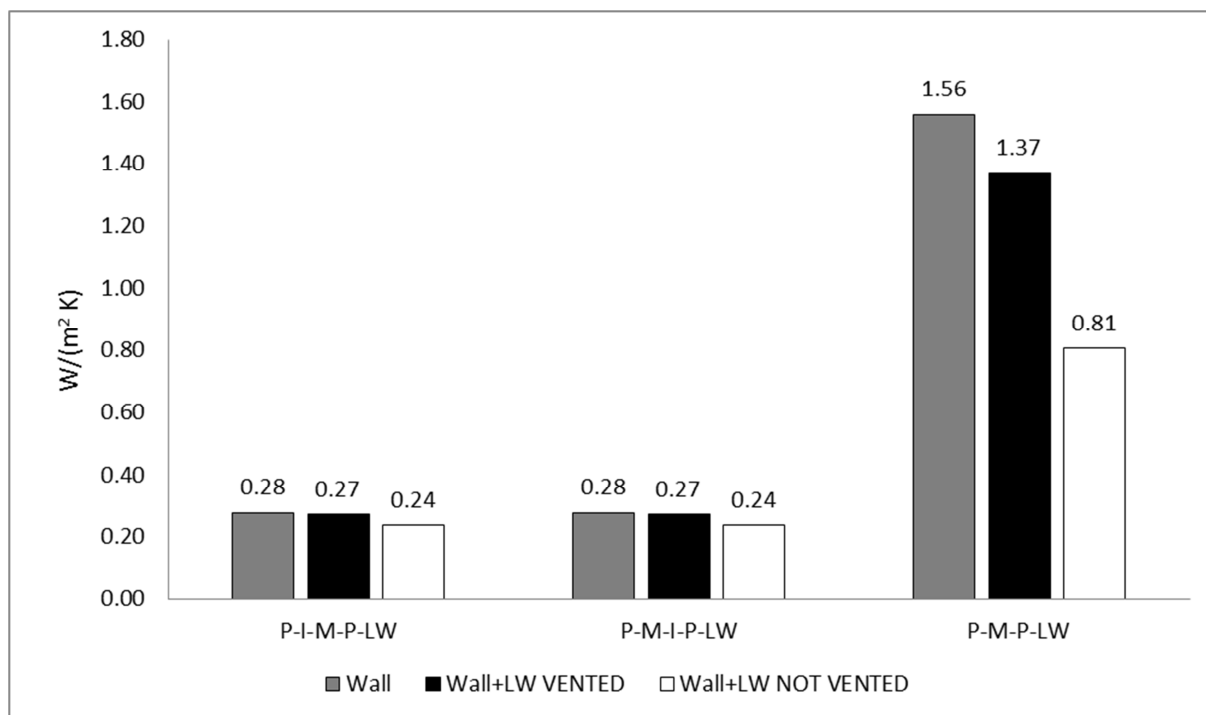


Figura 68 – Stima trasmittanza secondo UNI EN ISO 6946

7.2.2. STIMA CON L'UTILIZZO DEL MODELLO NUMERICO

Il modello numerico consente di determinare con precisione il comportamento termico dell'involucro, anche in regime dinamico, dando così la possibilità di calcolarne la trasmittanza equivalente in condizioni d'uso e valutando l'incidenza di due dei quattro aspetti più caratteristici precedentemente evidenziati: il tipo di intercapedine e la presenza dell'evapotraspirazione. Alcune considerazioni ed approfondimenti sono da effettuare in merito a questo ultimo aspetto al fine di rispettare le condizioni al contorno caratteristiche per il calcolo della trasmittanza secondo (UNI EN ISO 6946 2008). Il valore di trasmittanza è calcolato dal modello numerico in assenza di radiazione. Pur essendo una grossa limitazione nell'analisi reale della trasmittanza, questa considerazione ha permesso di poter comparare i valori calcolati da normativa con quelli calcolati dal modello. Inoltre, nonostante l'evapotraspirazione sia fortemente legata alla presenza di radiazione e quindi potenzialmente molto bassa o nulla in assenza di una forzante solare, si è scelto di considerare comunque un effetto di riduzione della temperatura superficiale esterna dovuta ad una minima quantità d'acqua evaporata a seguito di altri aspetti termofisici come la differenza di temperatura e pressione tra lo strato di foglie e l'aria esterna. E' stata dunque valutata una quantità ipotetica di calore latente sottratto allo strato di piante in una condizione di assenza di radiazione e con profilo di temperatura prevalentemente invernale. Con queste condizioni al contorno è stato calcolato un tasso di evapotraspirazione (Allen et al. 1998) pari a circa 5 l/g. Considerando, come già esposto nella sezione dedicata all'evapotraspirazione, un calore latente per l'acqua evaporante di 2450 kJ/kg si è imposta una sottrazione di calore costante pari a circa 16 W/m².

I risultati della stima sono mostrati in Figura 69 e Figura 70. E' possibile notare come il valore di trasmittanza non subisca variazioni significative tra i casi che considerano l'incidenza dell'evapotraspirazione e i casi che non la considerano. Tale osservazione vale solo per il sistema costruttivo con intercapedine aperta

riportato in Figura 69. Tale configurazione di aria in movimento nell'intercapedine di fatto annulla l'effetto superficiale esterno dell'evapotraspirazione. Diversa è invece la situazione nel caso di intercapedine chiusa. Il valore calcolato di trasmittanza della parete cambia notevolmente se si considera o meno l'effetto evapotraspirativo. Nel dettaglio, come mostrato in Figura 70, vi è un aumento considerevole dei valori di trasmittanza che si attesta intorno al 30% nei tre casi considerati. Questo è in linea con i risultati attesi poiché attraverso la simulazione a volumi finiti è possibile calcolare la temperatura del nodo esterno e legare il bilancio termico su quel nodo anche alla presenza dell'effetto di evapotraspirazione. A titolo di esempio si riporta un grafico in **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** in cui viene mostrato l'andamento della temperatura superficiale del nodo termico rappresentante le piante, con e senza l'effetto di evapotraspirazione.

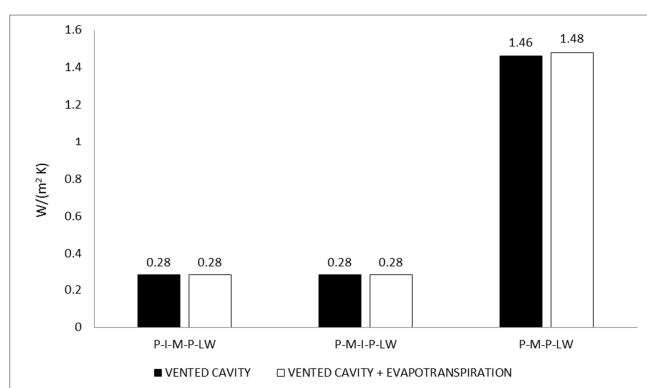


Figura 69 – Stima trasmittanza da modello numerico. Parete con intercapedine aperta

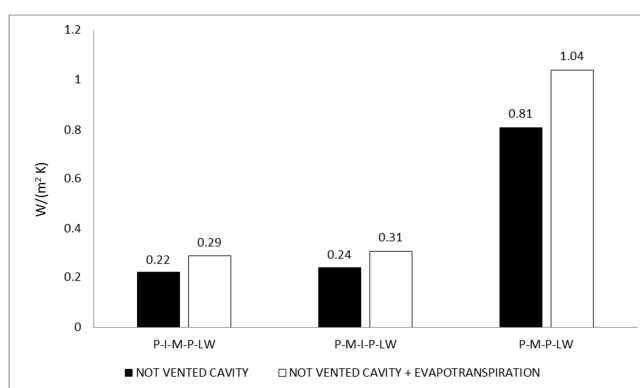


Figura 70 - Stima trasmittanza da modello numerico. Parete con intercapedine chiusa

7.2.3. CONFRONTO TRA I DUE METODI

Come risultato finale è stato possibile comparare i valori di trasmittanza ottenuti dalla stima semplificata utilizzando i parametri di normativa e i valori di trasmittanza stimati utilizzando il modello numerico a volumi finiti. E' necessario ricordare che per effettuare la comparazione è stato calcolato un valore di trasmittanza senza considerare l'effetto di evapotraspirazione, successivamente tale effetto è stato comunque inserito nella valutazione attraverso l'utilizzo del modello numerico. Un indice tipico dei rivestimenti vegetali è il LAI, già discusso nei capitoli precedenti, ma in queste valutazioni non è stato considerato poiché tale indice è fortemente legato alla presenza di radiazione solare e la sua variazione in assenza di tale forzante è praticamente ininfluenza.

I risultati della comparazione sono mostrati in Figura 71 e Figura 72. Nella prima, in cui è mostrato il caso di intercapedine ventilata, è possibile notare come l'unico caso di reale differenza tra i vari metodi sia il caso di parete senza isolante in cui la trasmittanza aumenta di circa il 7%. Non vi è differenza significativa tra i casi modellati con e senza effetto evapotraspirativo.

Diverso è il confronto nel caso di intercapedine non ventilata. I valori calcolati con il modello numerico differiscono in maniera evidente dai valori calcolati secondo il metodo della normativa soprattutto nel caso in

cui venga considerata l'evapotraspirazione. Si registrano differenze nell'ordine del 20% - 30% a seconda del caso considerato.

In conclusione, il calcolo a volumi finiti applicato alla determinazione della trasmittanza, mostra che nei casi in cui il rivestimento vegetale sia giustapposto ad una parete senza strato isolante, la differenza con i valori calcolati secondo normativa assume valori da tenere in considerazione nelle valutazioni energetiche. In particolare la differenza può essere dal 7-10% fino al 20-30% a seconda di intercapedine ventilata o chiusa.

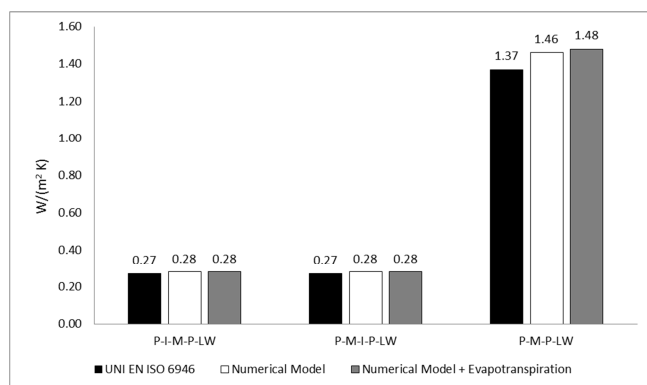


Figura 71 – Confronto trasmittanze con intercapedine ventilata

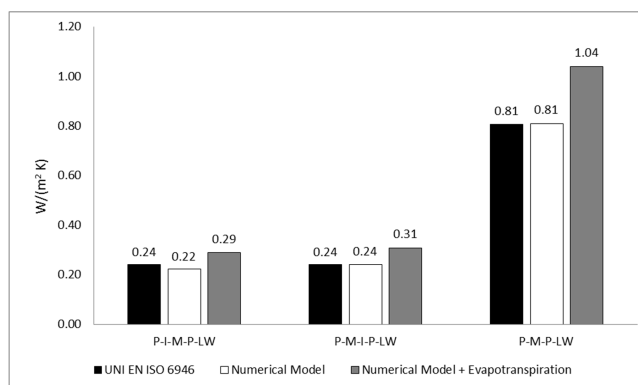


Figura 72 – Confronto trasmittanze con intercapedine chiusa

7.2.4. INCIDENZA RADIAZIONE SOLARE

Un considerazione va effettuata in merito all'incidenza della radiazione solare sul calcolo del flusso di calore entrante nell'involucro. Come analizzato nei paragrafi precedenti il calcolo della trasmittanza secondo normativa non prevede di considerare la radiazione solare, ma si basa solo su una differenza di temperatura imposta all'elemento da valutare. Tuttavia, tale incidenza non è da sottovalutare e cambia notevolmente le considerazioni relative all'effetto dell'evapotraspirazione. Nella fattispecie si era visto nel paragrafo 7.2.3 che considerare l'evapotraspirazione poteva incidere sul calcolo della trasmittanza anche per un 20%-30% nel caso di una parete con la giustapposizione di Living Wall ad intercapedine chiusa. Tale conclusione non risulta più valida se il calcolo viene effettuato in regime dinamico e inserendo anche l'interazione con la radiazione solare. Ovviamente in questo caso non si può più parlare di trasmittanza non essendo calcolata con un metodo standardizzato come quello proposto dalla UNI EN ISO 6946, ma piuttosto di *trasmittanza equivalente*. Per convenzione si è scelto di considerare positivo il flusso di calore entrante nell'ambiente considerato e negativo il flusso uscente da tale ambiente. Nei calcoli si è considerata una settimana invernale ed il flusso di calore rappresenta la sommatoria di tutti i flussi orari positivi o negativi nell'arco del periodo considerato. Come mostrato in Figura 73, l'incidenza dell'evapotraspirazione sul flusso di calore calcolato sul nodo interno del modello, corrispondente alla superficie interna dell'ambiente, è praticamente nulla nel caso di Living Wall con intercapedine ventilata e mostra qualche piccola variazione nel caso di Living Wall ad intercapedine chiusa. Nel bilancio complessivo di una settimana la differenza tra considerare e non considerare l'evapotraspirazione è, nel caso di intercapedine aperta, pari al 3‰, mentre nel caso di

intercapedine chiusa si attesto attorno al 3%. Come precedentemente ipotizzato, considerare l'interazione con la radiazione solare allontana notevolmente dalle ipotesi di regime stazionario e, se omessa al calcolo della trasmittanza, annulla, di fatto, l'effetto evapotraspirativo.

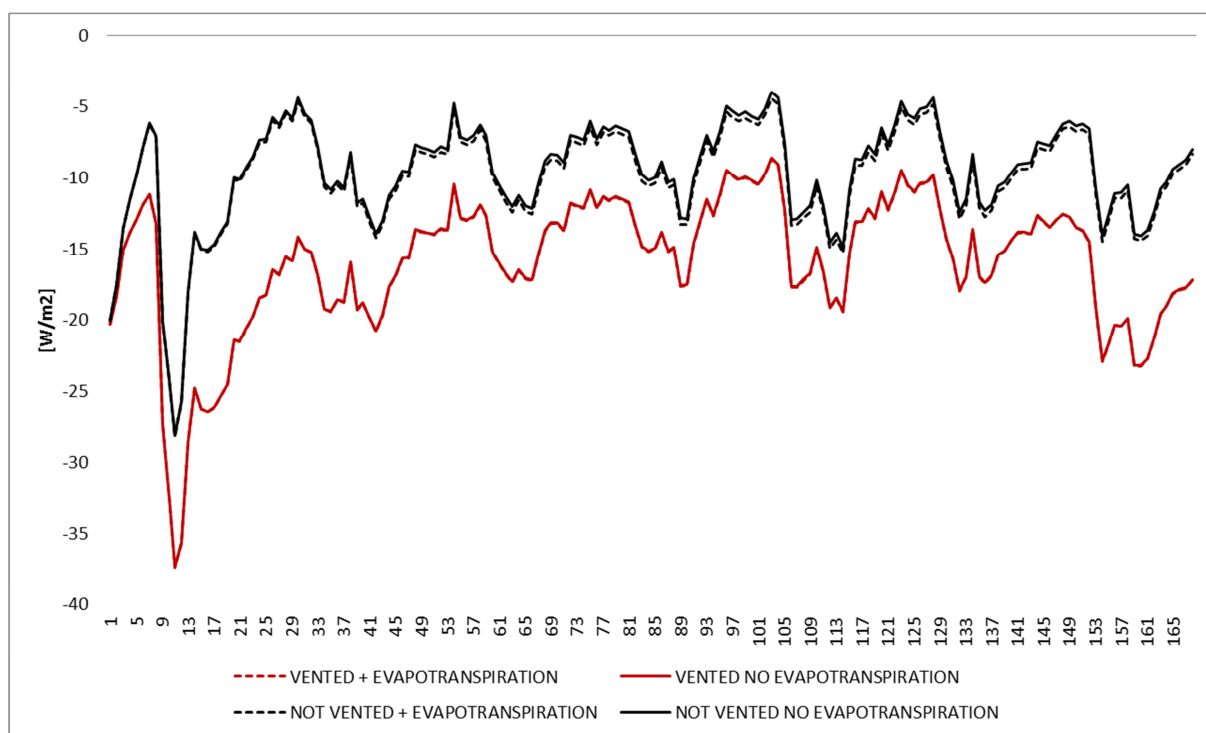


Figura 73 – Incidenza evapotraspirazione su andamento flusso di calore

8. CONCLUSIONI

Il presente lavoro si è occupato di studiare, caratterizzare e proporre un modello numerico di una particolare tipologia di componente edilizio denominata *Living Wall*. Questa particolare categoria di rivestimenti d'involucro è caratterizzata dalla presenza di un supporto strutturale ancorato alla parete esterna dell'edificio, su cui vengono posizionate diverse tipologie di vegetazione. Durante il periodo di ricerca è stato possibile effettuare il monitoraggio microclimatico di due tipologie di *Living Wall*. La prima tipologia consiste nell'apposizione di un rivestimento vegetale le cui caratteristiche distintive sono la presenza di un'intercapedine aperta con la parete dell'edificio e la coltivazione a giardino del supporto esterno; in questo lavoro tale tipologia è stata denominata LW-GaOp. La seconda tipologia presenta tra le caratteristiche principali un'intercapedine d'aria chiusa e la presenza di prato pre-seminato sui pannelli esterni; nel presente lavoro tale tipologia è stata denominata LW-GrCl.

Con riferimento alle tematiche di ricerca ancora aperte citate all'inizio del presente lavoro, è possibile fornire nuove risposte sulla base dei risultati emersi durante il periodo di ricerca.

Per ciò che concerne l'interazione energetica con l'edificio i principali risultati emersi nella fase di monitoraggio, possono essere riassunti considerando l'effetto sulle temperature superficiali, sulla portata d'aria in intercapedine e sui flussi di calore. In particolare per il LW-GaOp le temperature superficiali nel periodo estivo mostrano differenze di circa 20 K tra punti protetti dal rivestimento e punti non coperti. Tale valore è confrontabile con il valore monitorato per il LW-GrCl per il quale sono state registrate differenze di circa 14 K. Per il periodo invernale, durante giornate soleggiate, la differenza di temperatura può arrivare a circa 10 K per il primo rivestimento monitorato e a circa 8 K per il secondo. Dal monitoraggio emerge inoltre il differente comportamento degli involucri durante le ore notturne. Le pareti non ricoperte da vegetazione tendono a raffreddarsi molto più velocemente rispetto alle pareti ricoperte dal rivestimento. Tale fenomeno, dovuto all'emissione di calore per radiazione verso la volta celeste, mantiene più elevate le temperature superficiali delle pareti dotate di rivestimento vegetale sia durante il periodo estivo sia durante il periodo invernale, soprattutto nel caso del LW-GrCl.

Per il caso di LW-GaOp è stato possibile monitorare il comportamento dei flussi d'aria in intercapedine. È emerso che l'aria segue, durante il periodo estivo, un andamento alternato ed in particolare tende a muoversi dall'alto verso il basso durante il giorno e dal basso verso l'alto durante la notte per effetto delle differenti temperature tra l'interno dell'intercapedine e l'aria esterna. Le portate d'aria stimate all'interno dell'intercapedine raggiungono valori di circa 70 m³/h.

Un'ultima analisi sui flussi di calore è stata condotta durante le campagne di monitoraggio. In un'ottica di bilancio complessivo, durante il periodo estivo il LW-GaOp riduce l'ingresso di energia dall'esterno di circa il 70% se paragonato alla stessa parete senza rivestimento. Durante il periodo invernale la riduzione del flusso uscente dall'ambiente monitorato è di circa il 35%. Risultati differenti ma sostanzialmente paragonabili si sono ottenuti anche per il LW-GrCl per il quale la riduzione dei flussi entranti durante il periodo estivo è di circa il 90% e la riduzione dei flussi uscenti durante il periodo invernale è di circa il 20%.

Successivamente alla fase di monitoraggio è stato creato un modello matematico che simulasse il comportamento fisico dei *Living Walls*. La modellazione effettuata secondo l'approccio ai volumi finiti ha prodotto un modello numerico la cui accuratezza è stata valutata attraverso gli indici *Root Mean Square Error* e *Nash Sutcliffe Efficiency Coefficient*. I due indici hanno mostrato che il modello numerico, studiato per entrambi i casi oggetto di studio, fornisce risultati sufficientemente accurati. In particolare l'indice di efficienza NSEC è risultato sempre superiore a 0.7 in 6 casi di validazione su 8. Un indice NSCE vicino al valore 1 indica che il modello è in grado di riprodurre esattamente le condizioni misurate.

Infine, grazie alla modellazione numerica è stata effettuata una stima della trasmittanza termica dell'elemento di involucro dotato di rivestimento vegetale. La stima è stata effettuata imponendo al modello numerico le stesse condizioni al contorno utilizzate dalla normativa di riferimento per il calcolo della trasmittanza delle pareti edilizie, includendo anche l'effetto di evapotraspirazione, tipico dei rivestimenti vegetali e oggetto di indagine del presente lavoro. Sono state studiate tre tipologie di parete, con isolamento interno, esterno e senza isolamento. I risultati mostrano che nel caso di LW-GaOp la trasmittanza è sostanzialmente paragonabile a quella della parete nuda salvo il caso di muro massivo senza isolamento in cui il fenomeno evapotraspirativo aumenta il valore di trasmittanza di circa il 10%. Nel caso di LW-GrCl la differenza rispetto ad una trasmittanza standard è più elevata e può maggiorare il valore fino al 30% del valore della parete di riferimento, per effetto ancora una volta del fenomeno di evapotraspirazione che contribuisce a raffreddare la temperatura superficiale delle parete esterna e non viene ridimensionato dalla presenza di una intercapedine aperta. E' da notare come l'effetto di evapotraspirazione sia influente solo nel caso di condizioni al contorno (come quelle imposte dalla normativa) in cui non viene considerata la radiazione solare, diversamente il fenomeno perde di importanza a causa della ben più significativa incidenza della forzante climatica solare.

9. BIBLIOGRAFIA

Allen R, Pereira L, Raes D, Smith M (1998). Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements - FAO Irrigation and drainage paper 56.

ASHRAE HoF (2005). Ventilation and infiltration.

Barrio EPD (1998). Analysis of the green roofs cooling potential in buildings. *Energy Build.*, 27: 179-193.

Benford F and Bock J (1939). A time analysis of sunshine.

Bonacina C, Cavallini A, Mattarolo L (1989). Trasmissione del calore.

Cengel Y (2009). Termodinamica e trasmissione del calore.

Chen Y (2006). The intervention of plants in the conflicts between buildings and climate.

Cheng CY, Cheung KKS, Chu LM (2010). Thermal performance of a vegetated cladding system on facade walls. *Build. Environ.*, 45: 1779-1787.

Del Col D (2013). Concentrating photovoltaics, Phd Lecture.

Di Crescenti P (1299-1305). De ruralium commodarum.

Duffie J and Beckman W (2005). Solar engineering of thermal processes.

European Commission (2009). Impact assessment guidelines.

Jim CY and He H (2011). Estimating heat flux transmission of vertical greenery ecosystem. *Ecol. Eng.*, 37: 1112-1122.

Kiel DE and Wilson DJ (1986). Gravity driven airflows through open doors. *Proceedings of the 7th IEA Conference of the Air Infiltration Centre*,

Kontoleon KJ and Eumorfopoulou EA (2010). The effect of the orientation and proportion of a plant-covered wall layer on the thermal performance of a building zone. *Build. Environ.*, 45: 1287-1303.

Mazzali U, Peron F, Romagnoni P, Pulselli RM, Bastianoni S (2013). Experimental investigation on the energy performance of Living Walls in a temperate climate. *Build. Environ.*, 64: 57-66.

Montgomery D (2009). Design and Analysis of Engineering Experiments.

Nash JE and Sutcliffe JV (1970). River flow forecasting through conceptual models. *A discussion of principles. J. Hydrol.*, 10 (3): 282-290.

Oke T (1982). The energetic basis of the urban heat island. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 108:

Pérez G, Rincón L, Vila A, González JM, Cabeza LF (2011). Green vertical systems for buildings as passive systems for energy savings. *Appl. Energy*, 88: 4854-4859.

- Perini K, Ottelè M, Fraaij ALA, Haas EM, Raiteri R (2011). Vertical greening systems and the effect on air flow and temperature on the building envelope. 46: 2287.
- Perini K and Rosasco P (2013). Costebenefit analysis for green façades and living wall systems. *Building and Environment*, 70: 110.
- Pulselli RM, Pulselli FM, Mazzali U, Peron F, Bastianoni S (in proof). Emergy based evaluation of environmental performances of Living Wall and Grass Wall systems. *Energy and Buildings*,
- Raimondo D (2008). Pareti verdi: qualcosa in più oltre il fattore estetico. *Tesi di Laurea in Architettura - Politecnico di Torino*,
- Rosenfeld AH, Akbari H, Bretz S, Fishman BL, Kurn DM, Sailor D, Taha H (1995). Mitigation of urban heat islands: materials, utility programs, updates. *Energy Build.*, 22: 255-265.
- Rubio E, Caselles V, Badenas C (1997). Emissivity measurements of several soils and vegetation types in the 8–14, μm Wave band: Analysis of two field methods. *Remote Sens. Environ.*, 59: 490-521.
- Sheweka S and Magdy AN (2011). The Living walls as an Approach for a Healthy Urban Environment. *Energy Procedia*, 6: 592-599.
- Stec WJ, van Paassen AHC, Maziarz A (2005). Modelling the double skin façade with plants. *Energy Build.*, 37: 419-427.
- Taha H, Sailor D, Akbari H (1992). High-albedo Materials for Reducing Building Cooling Energy Use. *Lawrence Berkeley National Laboratory Report No. 31721*,
- Tatano V, Spinazzè F, Peron F, De Maria MM (2013). Observation of the urban heat island effect in outskirts of venice. *Proceedings of the Cisbat Conference 2013*,
- U.S. DOE (2010). Energy Plus Documentation, Input/Output Reference.
- UNI EN 673 (2011). UNI EN 673 - Determinazione della trasmittanza termica. 673:
- UNI EN ISO 6946 (2008). UNI EN ISO 6946:2008 - Thermal resistance and thermal transmittance - Calculation method.
- Wong NH, Kwang Tan AY, Chen Y, Sekar K, Tan PY, Chan D, Chiang K, Wong NC (2010). Thermal evaluation of vertical greenery systems for building walls. *Build. Environ.*, 45: 663-672.
- Wong NH, Tan AYK, Tan PY, Wong NC (2009). Energy simulation of vertical greenery systems. *Energy Build.*, 41: 1401-1408.

APPENDICE A – CODICE DI CALCOLO

Di seguito si riporta il codice scritto in Visual Basic for Applications scritto e validato durante questo lavoro per simulare il comportamento termofisico dei Living Walls. Il codice VBA prevede un collegamento al foglio elettronico di supporto, per questo motivo nel codice, alla sezione *assegnazione variabili e costanti* e nelle sezioni di *caricamento proprietà*, vengono richiamati intervalli (*ranges*) che devono essere specificati all'interno del foglio elettronico.

```
Option Explicit

Type Layer 'Dichiarazione struttura dati Layer'
Thickness As Single
Cond As Single
Density As Single
SpecHeat As Single
nNodes As Integer
End Type

Type Node 'Dichiarazione struttura dati Node'
Thickness_Prev As Single
Thickness_Next As Single
R_Prev As Single
R_Next As Single
Inertia As Single
Temp_PrevTimestep As Single
Temp_Actual As Single
Temp_PrevIteration As Single
End Type

Sub LivingWall()

***Definizione variabili***
Dim nLayers As Integer
Dim nLayer As Integer
Dim nTint As Integer
Dim nText As Integer
Dim StBolzConstant As Double
Dim ThCond_Air As Double
Dim Density_Air As Double
Dim Viscosity_Air As Double
Dim SpecHeat_Air As Double
Dim DeltaTau As Integer
Dim hi As Single
Dim he As Single
Dim alpha As Single
Dim AirCavity_Thickness As Single
Dim nRow As Integer
Dim Period As Integer
Dim nPeriod As Integer
Dim nNodes As Integer
Dim nNode As Integer
Dim nNodeInLayer As Integer
Dim Tol As Single
Dim Tol_Max As Single
Dim nIt As Integer
Dim nIt_Max As Integer
Dim Flux As Single
Dim AirFlowRate As Single
Dim hConvOpen As Single
Dim hConvClosed As Single
Dim hConvCanopy As Single
Dim AirVel As Single
Dim AirFlowRateWind As Single
```

Dim AirFlowRateBuoyancy As Double
 Dim AirNodeTemp As Single
 Dim AirNodeTemp_PrevIteration As Single
 Dim PlantNodeTemp As Single
 Dim PlantNodeTemp_PrevIteration As Single
 Dim Gr As Single
 Dim Pr As Single
 Dim a As Single
 Dim b As Single
 Dim Nusselt As Single
 Dim AlphaPlant As Single
 Dim TauPlant As Single
 Dim AlphaGround As Single
 Dim LAI As Single
 Dim Emissivity_Wall As Single
 Dim Emissivity_Plant As Single
 Dim Emissivity_Sky As Single
 Dim Emissivity_Ground As Single
 Dim ViewFactor_WallToPlant As Single
 Dim ViewFactor_WallToSky As Single
 Dim ViewFactor_WallToGround As Single
 Dim ViewFactor_PlantToWall As Single
 Dim ViewFactor_PlantToSky As Single
 Dim ViewFactor_PlantToGround As Single
 Dim Tground As Single
 Dim Lat As Single
 Dim node7 As Single
 Dim node7b As Single
 Dim node9 As Single
 Dim node9b As Single
 Dim node10plant As Single
 Dim node10sky As Single
 Dim node10ground As Single

*****Definizione vettori e matrici*****

Dim Tint()
 Dim Text()
 Dim SolRad()
 Dim RelHum()
 Dim Vwind()
 Dim Layers() As Layer
 Dim LWLayers() As Layer
 Dim NodeTemp() As Single 'Matrice Temperature
 Dim AirNodeTempVector() As Single
 Dim PlantNodeTempVector() As Single
 Dim TskyVector() As Single
 Dim LWNNodeTemp() As Single 'Matrice Temperature
 Dim Nodes() As Node 'Vettore nodi Building Wall Tipo Node
 Dim LWNodes() As Node 'Vettore nodi Living Wall Tipo Node
 Dim nIts() As Integer 'Matrice numero iterazioni
 Dim Tsky() As Node
 Dim LatentHeat()

*****Assegnazione variabili e costanti*****

StBolzConstant = 0.0000000567
 ThCond_Air = 0.026
 Density_Air = 1.21
 Viscosity_Air = 0.000018
 SpecHeat_Air = 1006
 DeltaTau = 3600
 hi = Range("Hconv_Int")
 he = Range("Hconv_Ext")
 hConvCanopy = Range("Hconv_Canopy")
 AirCavity_Thickness = Range("AirCavity_Thickness")
 a = 0.035
 b = 0.38

```

Tol_Max = Range("Tolerance")
nIt_Max = Range("nIt_Max")
Period = Range("period").Count
nLayers = Range("Layers").Count
AlphaPlant = 1 - Range("SolarRefl_Plant") - Range("SolarTransmission_Plant")
TauPlant = Range("SolarTransmission_Plant")
AlphaGround = Range("SolarAbs_Ground")
LAI = Range("LeafAreaIndex_Sum")
Emissivity_Wall = Range("emissivity_wall")
Emissivity_Plant = Range("emissivity_plant")
Emissivity_Sky = Range("emissivity_sky")
Emissivity_Ground = Range("emissivity_ground")
ViewFactor_WallToPlant = Range("viewfactor_WtoPL")
ViewFactor_WallToSky = Range("viewfactor_WtoSKY")
ViewFactor_WallToGround = Range("viewfactor_WtoGr")
ViewFactor_PlantToWall = Range("viewfactor_PLtoW")
ViewFactor_PlantToSky = Range("viewfactor_PLtoSKY")
ViewFactor_PlantToGround = Range("viewfactor_PLtoGr")
Tground = Range("Temperature_Ground")

***Assegnazione e dimensionamento vettori e matrici***
Tint = Range("Tint")
Text = Range("Text")
SolRad = Range("SolRad")
RelHum = Range("RelHum")
Vwind = Range("Vwind")
ReDim Layers(1 To nLayers)
ReDim LWLayers(nLayers + 2 To nLayers + 2) 'In mezzo c'è il layer air cavity

***Caricamento proprietà layers muro***
For nLayer = 1 To nLayers
  Layers(nLayer).Cond = Range("BuildingWall").Cells(nLayer, 2).Value
  Layers(nLayer).Density = Range("BuildingWall").Cells(nLayer, 3).Value
  Layers(nLayer).SpecHeat = Range("BuildingWall").Cells(nLayer, 4).Value
  Layers(nLayer).Thickness = Range("BuildingWall").Cells(nLayer, 5).Value
  Layers(nLayer).nNodes = Range("BuildingWall").Cells(nLayer, 6).Value
Next nLayer

***Caricamento proprietà layer LW***
LWLayers(nLayers + 2).Cond = Range("LivingWall").Cells(1, 2).Value
LWLayers(nLayers + 2).Density = Range("LivingWall").Cells(1, 3).Value
LWLayers(nLayers + 2).SpecHeat = Range("LivingWall").Cells(1, 4).Value
LWLayers(nLayers + 2).Thickness = Range("LivingWall").Cells(1, 5).Value
LWLayers(nLayers + 2).nNodes = Range("LivingWall").Cells(1, 6).Value

*** Calcolo numero nodi BUILDING WALL ***
For nLayer = 1 To nLayers
  nNodes = nNodes + Layers(nLayer).nNodes
Next nLayer

nNodes = nNodes - (nLayers - 1) 'Tolgo i nodi alle interfacce che altrimenti verrebbero contati due volte ***

ReDim NodeTemp(1 To Period, 1 To nNodes)
ReDim AirNodeTempVector(1 To Period, 1 To 1)
ReDim PlantNodeTempVector(1 To Period, 1 To 1)
ReDim TskyVector(1 To Period, 1 To 1)
ReDim LWNodeTemp(1 To Period, 1 To 2)
ReDim Nodes(1 To nNodes)
ReDim LWNodes(nNodes + 2 To nNodes + 2 + LWLayers(nLayers + 2).nNodes - 1) 'In mezzo c'è il nodo AirCavity
ReDim nIts(1 To Period, 1 To 1)
ReDim Tsky(1 To Period, 1 To 1)
ReDim LatentHeat(1 To Period, 1 To 1)

*** BUILDING WALL: Per tutti i layers, per ogni nodo, definisco le proprietà del tipo nodo ***

nNode = 0

```

```

For nLayer = 1 To nLayers
  For nNodeInLayer = 1 To Layers(nLayer).nNodes
    If nLayer = 1 And nNodeInLayer = 1 Then 'Caso 1: primo nodo nel primo layer (nodo verso ambiente interno)
      nNode = nNode + 1
      Nodes(nNode).Thickness_Prev = 0
      Nodes(nNode).Thickness_Next = (Layers(nLayer).Thickness / (Layers(nLayer).nNodes - 1))
      Nodes(nNode).R_Prev = 1 / hi
      Nodes(nNode).R_Next = Nodes(nNode).Thickness_Next / Layers(nLayer).Cond
      Nodes(nNode).Inertia = ((Layers(nLayer).Thickness / ((Layers(nLayer).nNodes - 1) * 2))) * Layers(nLayer).Density *
Layers(nLayer).SpecHeat
    End If

    If nNodeInLayer = Layers(nLayer).nNodes And nLayer <> nLayers Then 'Caso 2: ultimo nodo nel layer tranne per l'ultimo layer
      nNode = nNode + 1
      Nodes(nNode).Thickness_Prev = Layers(nLayer).Thickness / (Layers(nLayer).nNodes - 1)
      Nodes(nNode).Thickness_Next = Layers(nLayer + 1).Thickness / (Layers(nLayer + 1).nNodes - 1)
      Nodes(nNode).R_Prev = Nodes(nNode).Thickness_Prev / Layers(nLayer).Cond
      Nodes(nNode).R_Next = Nodes(nNode).Thickness_Next / Layers(nLayer + 1).Cond
      Nodes(nNode).Inertia = ((Nodes(nNode).Thickness_Prev / 2) * Layers(nLayer).Density * Layers(nLayer).SpecHeat) +
((Nodes(nNode).Thickness_Next / 2) * Layers(nLayer + 1).Density * Layers(nLayer + 1).SpecHeat)
    End If

    If nNodeInLayer = Layers(nLayer).nNodes And nLayer = nLayers Then 'Caso 3: Ultimo nodo dell'ultimo layer (nodo verso
ambiente esterno)
      nNode = nNode + 1
      Nodes(nNode).Thickness_Prev = Layers(nLayer).Thickness / (Layers(nLayer).nNodes - 1)
      Nodes(nNode).Thickness_Next = 0
      Nodes(nNode).R_Prev = Nodes(nNode).Thickness_Prev / Layers(nLayer).Cond
      Nodes(nNode).R_Next = 1 / he
      Nodes(nNode).Inertia = (Layers(nLayer).Thickness / ((Layers(nLayer).nNodes - 1) * 2)) * Layers(nLayer).Density *
Layers(nLayer).SpecHeat
    End If

    If nNodeInLayer <> 1 And nNodeInLayer <> Layers(nLayer).nNodes Then 'Caso 4: nodo nel layer (nodo interno)
      nNode = nNode + 1
      Nodes(nNode).Thickness_Prev = Layers(nLayer).Thickness / (Layers(nLayer).nNodes - 1)
      Nodes(nNode).Thickness_Next = Nodes(nNode).Thickness_Prev
      Nodes(nNode).R_Prev = Nodes(nNode).Thickness_Prev / Layers(nLayer).Cond
      Nodes(nNode).R_Next = Nodes(nNode).R_Prev
      Nodes(nNode).Inertia = ((Nodes(nNode).Thickness_Prev / 2) * Layers(nLayer).Density * Layers(nLayer).SpecHeat) +
((Nodes(nNode).Thickness_Next / 2) * Layers(nLayer).Density * Layers(nLayer).SpecHeat)
    End If

    Next nNodeInLayer
  Next nLayer

*** LIVING WALL: Per I DUE NODI, definisco le proprietà del tipo nodo ***
LWNodes(nNodes + 2).Thickness_Prev = 0
LWNodes(nNodes + 2).Thickness_Next = LWLayers(nLayers + 2).Thickness / (LWLayers(nLayers + 2).nNodes - 1)
LWNodes(nNodes + 2).R_Next = LWNodes(nNodes + 2).Thickness_Next / LWLayers(nLayers + 2).Cond
LWNodes(nNodes + 2).Inertia = ((LWLayers(nLayers + 2).Thickness / ((LWLayers(nLayers + 2).nNodes - 1) * 2))) *
LWLayers(nLayers + 2).Density * LWLayers(nLayers + 2).SpecHeat

LWNodes(nNodes + 3).Thickness_Prev = LWLayers(nLayers + 2).Thickness / (LWLayers(nLayers + 2).nNodes - 1)
LWNodes(nNodes + 3).Thickness_Next = 0
LWNodes(nNodes + 3).R_Prev = LWNodes(nNodes + 3).Thickness_Prev / LWLayers(nLayers + 2).Cond
LWNodes(nNodes + 3).Inertia = (LWLayers(nLayers + 2).Thickness / ((LWLayers(nLayers + 2).nNodes - 1) * 2)) *
LWLayers(nLayers + 2).Density * LWLayers(nLayers + 2).SpecHeat

*** Inizializzo le variabili per il primo Timestep e prendo la temperatura di primo tentativo***

For nNode = 1 To nNodes
  Nodes(nNode).Temp_Actual = Range("FirstAttemptTemp")
Next nNode
LWNodes(nNodes + 2).Temp_Actual = Range("FirstAttemptTemp")

```



```

LWNodes(nNodes + 3).Temp_Actual = Range("FirstAttemptTemp")
AirNodeTemp = Range("FirstAttemptTemp")
PlantNodeTemp = Range("FirstAttemptTemp")
hConvClosed = 5
hConvOpen = 5

*** Inizio del ciclo For con nidificato ciclo Do While ***

For nPeriod = 1 To Period
nIt = 0
Tol = 1000

  For nNode = 1 To nNodes *** La temperatura in questo timestep diventa, per l'inizio del ciclo, la temperatura del timestep precedente ***
    Nodes(nNode).Temp_PrevTimestep = Nodes(nNode).Temp_Actual
  Next nNode
  LWNodes(nNodes + 2).Temp_PrevTimestep = LWNodes(nNodes + 2).Temp_Actual
  LWNodes(nNodes + 3).Temp_PrevTimestep = LWNodes(nNodes + 3).Temp_Actual

*** Calore Latente***
  For Lat = 1 To Period
    LatentHeat(Lat, 1) = Range("FixedLatHeat")
    'LatentHeat = Range("LatentHeat").Value
  Next Lat

*** Tsky ***
  If Text(nPeriod, 1) > 0 Then
    Tsky(nPeriod, 1).Temp_Actual = Text(nPeriod, 1) * (0.55 + 0.0385 * Sqr(610.5 * Exp((17.269 * Text(nPeriod, 1) / (237.3 + Text(nPeriod, 1))) * RelHum(nPeriod, 1) / 100)) ^ 0.25)
  Else
    Tsky(nPeriod, 1).Temp_Actual = Text(nPeriod, 1) * (0.55 + 0.0385 * Sqr(610.5 * Exp((21.875 * Text(nPeriod, 1) / (265.5 + Text(nPeriod, 1))) * RelHum(nPeriod, 1) / 100)) ^ 0.25)
  End If

  Do While (Tol > Tol_Max) And (nIt < nIt_Max)

    nIt = nIt + 1
    Tol = 0

    For nNode = 1 To nNodes
      Nodes(nNode).Temp_PrevIteration = Nodes(nNode).Temp_Actual 'All'interno del ciclo Do While la Temp_Actual diventa la Temp_PrevIteration ad ogni ciclo
    Next nNode
    LWNodes(nNodes + 2).Temp_PrevIteration = LWNodes(nNodes + 2).Temp_Actual
    LWNodes(nNodes + 3).Temp_PrevIteration = LWNodes(nNodes + 3).Temp_Actual
    AirNodeTemp_PrevIteration = AirNodeTemp
    PlantNodeTemp_PrevIteration = PlantNodeTemp

    For nNode = 1 To nNodes

      If nNode = 1 Then 'Caso 1: nodo verso ambiente interno
        Nodes(nNode).Temp_Actual = ((Nodes(nNode).Inertia / DeltaTau) * Nodes(nNode).Temp_PrevTimestep + hi * Tint(nPeriod, 1) + Nodes(nNode + 1).Temp_Actual / Nodes(nNode).R_Next) / ((Nodes(nNode).Inertia / DeltaTau) + hi + 1 / Nodes(nNode).R_Next)
      End If

      If nNode = nNodes Then 'Caso 2: nodo verso ambiente esterno senza LW
        If Range("LW_YoN").Value = "N" Then
          Nodes(nNode).Temp_Actual = ((Nodes(nNode).Inertia / DeltaTau) * Nodes(nNode).Temp_PrevTimestep + he * Text(nPeriod, 1) + Nodes(nNode - 1).Temp_Actual / Nodes(nNode).R_Prev + alpha * SolRad(nPeriod, 1)) / ((Nodes(nNode).Inertia / DeltaTau) + he + 1 / Nodes(nNode).R_Prev)
        Else
          If Range("AC_OoC").Value = "O" Then 'Caso 2: nodo verso ambiente esterno con LW e intercapedine aperta
            node7 = 4 * StBolzConstant / (1 / Emissivity_Wall + 1 / Emissivity_Wall - 1) * ((Nodes(nNode).Temp_Actual + LWNodes(nNodes + 2).Temp_Actual) / 2 + 273.15) ^ 3
          End If
        End If
      End If
    Next nNode
  End Do
End For

```

```

Nodes(nNode).Temp_Actual = _
(Nodes(nNode).Inertia / DeltaTau * Nodes(nNode).Temp_PrevTimestep + _
hConvOpen * (AirNodeTemp + Text(nPeriod, 1)) / 2 + _
Nodes(nNode - 1).Temp_Actual / Nodes(nNode).R_Prev + _
node7 * LWNodes(nNodes + 2).Temp_Actual) / _
(Nodes(nNode).Inertia / DeltaTau + _
hConvOpen + _
1 / Nodes(nNode).R_Prev + _
node7)

```

Else 'Caso 2: nodo verso ambiente esterno con LW e intercapedine chiusa

```

node7b = 4 * StBolzConstant / (1 / Emissivity_Wall + 1 / Emissivity_Wall - 1) * ((Nodes(nNode).Temp_Actual +
LWNodes(nNodes + 2).Temp_Actual) / 2 + 273.15) ^ 3

```

```

Nodes(nNode).Temp_Actual = _
(Nodes(nNode).Inertia / DeltaTau * Nodes(nNode).Temp_PrevTimestep + _
hConvClosed * AirNodeTemp + _
Nodes(nNode - 1).Temp_Actual / Nodes(nNode).R_Prev + _
node7b * LWNodes(nNodes + 2).Temp_Actual) / _
(Nodes(nNode).Inertia / DeltaTau + _
hConvClosed + _
1 / Nodes(nNode).R_Prev + _
node7b)

```

End If

End If

End If

If nNode <> 1 And nNode <> nNodes Then 'Caso 3: nodo interno

```

Nodes(nNode).Temp_Actual = ((Nodes(nNode).Inertia / DeltaTau) * Nodes(nNode).Temp_PrevTimestep + Nodes(nNode -
1).Temp_Actual / Nodes(nNode).R_Prev + Nodes(nNode + 1).Temp_Actual / Nodes(nNode).R_Next) / ((Nodes(nNode).Inertia /
DeltaTau) + 1 / Nodes(nNode).R_Prev + 1 / Nodes(nNode).R_Next)

```

End If

Next nNode

*** Coefficiente di convezione nel caso di intercapedine aperta ***

```

AirFlowRateWind = Vwind(nPeriod, 1) * (270 / 10) ^ 0.14 * (0.1 / 370) ^ 0.22 * Range("PressureCoeff").Value *
Range("AirCavity_Thickness").Value
AirFlowRateBuoyancy = Range("DischargeCoeff").Value * Range("AirCavity_Thickness").Value * Sqr(2 * 9.81 *
Range("Hwall").Value / 2 * Abs(AirNodeTemp - Text(nPeriod, 1)) / Abs(AirNodeTemp))
AirFlowRate = AirFlowRateWind + AirFlowRateBuoyancy
AirVel = AirFlowRate / AirCavity_Thickness
hConvOpen = 4 + 4 * AirVel

```

*** Coefficiente di convezione nel caso di intercapedine chiusa ***

```

Gr = Density_Air ^ 2 * AirCavity_Thickness ^ 3 * 9.81 * Abs(Nodes(nNodes).Temp_Actual - LWNodes(nNodes +
2).Temp_Actual) / (Abs(Nodes(nNodes).Temp_Actual + LWNodes(nNodes + 2).Temp_Actual) / 2 * Viscosity_Air ^ 2)
Pr = SpecHeat_Air * Viscosity_Air / ThCond_Air
Nusselt = a * (Gr * Pr) ^ b
hConvClosed = Nusselt * ThCond_Air / AirCavity_Thickness

```

*** Nodo Aria ***

If Range("LW_YoN").Value = "Y" Then

If Range("AC_OoC").Value = "O" Then

```

AirNodeTemp = _
(Range("Hwall").Value * hConvOpen * Nodes(nNodes).Temp_Actual - _
Text(nPeriod, 1) + _
LWNodes(nNodes + 2).Temp_Actual + _
AirCavity_Thickness * AirVel * Density_Air * SpecHeat_Air * Text(nPeriod, 1)) / _

```

```

((AirCavity_Thickness * AirVel * Density_Air * SpecHeat_Air) + _
Range("Hwall").Value * hConvOpen)
Else
AirNodeTemp = (Nodes(nNodes).Temp_Actual + LWNodes(nNodes + 2).Temp_Actual) / 2
End If
End If

*** Nodi struttura LW ***

If Range("AC_OoC").Value = "O" Then 'Caso nodo verso intercapedine lato LW e intercapedine aperta'

node9 = 4 * StBolzConstant / (1 / Emissivity_Wall + 1 / Emissivity_Wall - 1) * ((Nodes(nNodes).Temp_Actual +
LWNodes(nNodes + 2).Temp_Actual) / 2 + 273.15) ^ 3

LWNodes(nNodes + 2).Temp_Actual = _
(LWNodes(nNodes + 2).Inertia / DeltaTau * LWNodes(nNodes + 2).Temp_PrevTimestep + _
hConvOpen * (AirNodeTemp + Text(nPeriod, 1)) / 2 + _
LWNodes(nNodes + 3).Temp_Actual / LWNodes(nNodes + 2).R_Next + _
node9 * Nodes(nNodes).Temp_Actual) / _
(LWNodes(nNodes + 2).Inertia / DeltaTau + _
hConvOpen + 1 / LWNodes(nNodes + 2).R_Next + _
node9)

Else 'Caso nodo verso intercapedine lato LW e intercapedine chiusa'

node9b = 4 * StBolzConstant / (1 / Emissivity_Wall + 1 / Emissivity_Wall - 1) * ((Nodes(nNodes).Temp_Actual +
LWNodes(nNodes + 2).Temp_Actual) / 2 + 273.15) ^ 3

LWNodes(nNodes + 2).Temp_Actual = _
(LWNodes(nNodes + 2).Inertia / DeltaTau * LWNodes(nNodes + 2).Temp_PrevTimestep + _
hConvClosed * AirNodeTemp + _
LWNodes(nNodes + 3).Temp_Actual / LWNodes(nNodes + 2).R_Next + _
node9b * Nodes(nNodes).Temp_Actual) / _
(LWNodes(nNodes + 2).Inertia / DeltaTau + _
hConvClosed + 1 / LWNodes(nNodes + 2).R_Next + _
node9b)

End If

node10plant = 4 * StBolzConstant * Emissivity_Plant * ViewFactor_WallToPlant * ((LWNodes(nNodes + 3).Temp_Actual
+ PlantNodeTemp) / 2 + 273.15) ^ 3
node10sky = 4 * StBolzConstant * Emissivity_Sky * ViewFactor_WallToSky * ((LWNodes(nNodes + 3).Temp_Actual +
Tsky(nPeriod, 1).Temp_Actual) / 2 + 273.15) ^ 3
node10ground = 4 * StBolzConstant * Emissivity_Ground * ViewFactor_WallToGround * ((LWNodes(nNodes +
3).Temp_Actual + Tground) / 2 + 273.15) ^ 3

LWNodes(nNodes + 3).Temp_Actual = _
(LWNodes(nNodes + 3).Inertia / DeltaTau * LWNodes(nNodes + 3).Temp_PrevTimestep + _
LWNodes(nNodes + 2).Temp_Actual / LWNodes(nNodes + 3).R_Prev + _
hConvCanopy * Text(nPeriod, 1) + _
AlphaGround * SolRad(nPeriod, 1) * TauPlant + _
node10plant * PlantNodeTemp + _
node10sky * Tsky(nPeriod, 1).Temp_Actual + _
node10ground * Tground) / _
(LWNodes(nNodes + 3).Inertia / DeltaTau + _
1 / LWNodes(nNodes + 3).R_Prev + hConvCanopy + _
node10plant + _
node10sky + _
node10ground)

*** Nodo Piante ***

PlantNodeTemp = (-LatentHeat(nPeriod, 1) + (AlphaPlant * SolRad(nPeriod, 1) + LAI * hConvCanopy) * Text(nPeriod, 1) + _

```

```

      (4 * StBolzConstant * Emissivity_Plant * ViewFactor_PlantToWall * (((LWNodes(nNodes + 3).Temp_Actual +
PlantNodeTemp) / 2 + 273.15) ^ 3)) * LWNodes(nNodes + 3).Temp_Actual + _
      (4 * StBolzConstant * Emissivity_Sky * ViewFactor_PlantToSky * (((Tsky(nPeriod, 1).Temp_Actual +
PlantNodeTemp) / 2 + 273.15) ^ 3)) * Tsky(nPeriod, 1).Temp_Actual + _
      (4 * StBolzConstant * Emissivity_Ground * ViewFactor_PlantToGround * (((Tground + PlantNodeTemp) / 2 +
273.15) ^ 3)) * Tground) / _
      ((AlphaPlant * SolRad(nPeriod, 1) + LAI * hConvCanopy) + _
      (4 * StBolzConstant * Emissivity_Plant * ViewFactor_PlantToWall * (((LWNodes(nNodes + 3).Temp_Actual +
PlantNodeTemp) / 2 + 273.15) ^ 3)) + _
      (4 * StBolzConstant * Emissivity_Sky * ViewFactor_PlantToSky * (((Tsky(nPeriod, 1).Temp_Actual +
PlantNodeTemp) / 2 + 273.15) ^ 3)) + _
      (4 * StBolzConstant * Emissivity_Ground * ViewFactor_PlantToGround * (((Tground + PlantNodeTemp) / 2 +
273.15) ^ 3)))

```

***** Calcolo tolleranza *****

```

For nNode = 1 To nNodes
  Tol = Tol + Abs(Nodes(nNode).Temp_Actual - Nodes(nNode).Temp_PrevIteration)
Next nNode
Tol = Tol + Abs(LWNodes(nNodes + 2).Temp_Actual - LWNodes(nNodes + 2).Temp_PrevIteration)
Tol = Tol + Abs(LWNodes(nNodes + 3).Temp_Actual - LWNodes(nNodes + 3).Temp_PrevIteration)
Tol = Tol + Abs(AirNodeTemp - AirNodeTemp_PrevIteration)
Tol = Tol + Abs(PlantNodeTemp - PlantNodeTemp_PrevIteration)

```

Loop

***** Caricamento vettori e matrici *****

```

For nNode = 1 To nNodes
  NodeTemp(nPeriod, nNode) = Nodes(nNode).Temp_Actual
Next nNode
LWNodeTemp(nPeriod, 1) = LWNodes(nNodes + 2).Temp_Actual
LWNodeTemp(nPeriod, 2) = LWNodes(nNodes + 3).Temp_Actual
AirNodeTempVector(nPeriod, 1) = AirNodeTemp
PlantNodeTempVector(nPeriod, 1) = PlantNodeTemp
TskyVector(nPeriod, 1) = Tsky(nPeriod, 1).Temp_Actual
nIts(nPeriod, 1) = nIt

```

Next nPeriod

End Sub

APPENDICE B – NOMENCLATURA EQUAZIONI MODELLO NUMERICO

c	Calore specifico [J kg ⁻¹ K ⁻¹]
C_d	Coefficiente di scarico [-]
C_v	Coefficiente di pressione per la cavità d'aria[-]
e_s	Pressione di saturazione del vapor d'acqua [kPa]
e_s	Pressione di vapore [kPa]
f_v	Fattore di vista [-]
g	Accelerazione di gravità [m s ⁻²]
G	Flusso di calore giornaliero con il terreno [MJ m ⁻² day ⁻¹]
H	Altezza del Living Wall [m]
HF	Flusso di calore [W m ⁻²]
h	Coefficiente di scambio termico [W m ⁻² K ⁻²]
k	Coefficiente di estinzione [-]
LAI	Leaf area index [m ² m ⁻²]
Nu	Numero di Nusselt [-]
Q_{lat}	Calore latente legato al fenomeno dell'evapotraspirazione [W m ⁻²]
R	Radiazione solare giornaliera incidente sul piano delle piante [MJ m ⁻² day ⁻¹]
r	Coefficiente di riflessione solare [-]
rad_{sol}	Radiazione solare sul piano delle piante [W m ⁻²]
s	Spessore [m]
T	Temperatura assoluta [K]
θ	Temperatura relativa[°C]
θ^0	Temperatura relativa al timestep precedente [°C]
v	Velocità dell'aria [m s ⁻¹]
\dot{V}	Portata d'aria [m ³ s ⁻¹]
α	Coefficiente di assorbimento solare [-]
γ	Costante psicrometrica [kPa K ⁻¹]
Δ	Inclinazione curva pressione di vapore-temperatura [kPa K ⁻¹]
$\Delta\tau$	Timestep [s]
ε	Emissività [-]
φ	Umidità Relativa[%]
λ	Conducibilità termica [W m ⁻¹ K ⁻¹]
ρ	Densità [kg m ⁻³]
σ	Costante di Stefan-Boltzmann [W m ⁻² K ⁻⁴]
τ	Coefficiente di trasmissione Shortwave [-]

SUBSCRIPTS

dc	Canopy. Aria tra le foglie
e	Aria esterna
gr	Terreno
i	Aria interna
l	l-th layer
lw	Longwave
m	Medio
n	n-th nodo
pl	Piante
s	Superficie
sw	Shortwave
w	Muro

RINGRAZIAMENTI

Alla mia famiglia. A Francesca. A Mamma, Papà e Gloria. A Martino, Liliana, Letizia, Mirko, Federico, Fabio e a tutti i bambini e i ragazzi.

A tutti i colleghi. Grazie all'ing. Massimiliano Scarpa, persona di grande serietà e trasparenza che mi ha trasmesso, senza indugi o interessi, conoscenze indispensabili per produrre questo lavoro.

Un saluto e un ringraziamento al prof. Fabio Peron per le opportunità che mi ha offerto in questi anni.

Ringrazio per la disponibilità e saluto poi altri compagni di viaggio: il prof. Piercarlo Romagnoni, Paolo Ruggeri, Silvio Nocera, Riccardo Pulselli, Massimiliano De Bei e Michela De Maria.

PUBBLICAZIONI SCIENTIFICHE DI RILIEVO

- PERON, F., MAZZALI, U., SCARPA, M., 2013. 'Field measurements of a green roof and development of a simplified numerical model'. Proceedings of CISBAT 2013 International Conference. ISBN: ISBN -978-2-8399-1280-8
- MAZZALI, U., PERON, F., ROMAGNONI, P., PULSELLI, R., BASTIANONI, S., 2013. 'Experimental investigation on the energy performance of Living Walls in a temperate climate'. Building and Environment 64 (2013) 57-66.
- MAZZALI, U., PERON, F., SCARPA, M., 2012. 'Development and Validation of a Numerical Model for Living Walls via Field Measurements and Evaluation of Thermal Performance on a Building Wall'. Proceedings of Cobee, Boulder [Colorado]. ISBN: 978-0-9816881-9-0; 0-9816881-9-5
- MAZZALI, U., OLIVIERI, M., PERON, F., TATANO, V., 2011. 'Thermal effects of creepers and turfgrass wall cladding on building envelope'. Proceedings of Cisbat 2011, Lausanne [Switzerland]. ISBN: Vol.I: 978-2-8399-0907-5 Vol.II: 978-2-8399-0918-1
- PERON, F., TATANO, V., MAZZALI, U., 2010. 'Vertical green: low-tech vs high-tech. Trial test to verify the energy effects of cladding systems'. Proceedings of the Abitare il futuro...dopo Copenhagen Conference, Napoli, pp. 1409-1418. ISBN: 978-88-8497-163-0
- MAZZALI, U., PERON, F., TATANO, V., 2010. 'Il verde verticale: effetti energetici di un sistema di rivestimento'. Progetto sostenibile, no. 27, pp. 104-109. ISSN: 1974-3327
- MAZZALI, U., PERON, F., SCARPA, M., 2012. 'Thermo-physical Performances of Living Walls via Field Measurements and Numerical Analysis'. Proceedings of EcoArchitecture 2012, Kos [Greece]. ISBN: 978-1-84564-614-1