

## ■ 7 Prestazioni termiche delle coperture a verde

*Vi è ancora molta confusione sull'argomento delle prestazioni termiche delle coperture a verde.*

*Si è spesso attribuito ai tetti verdi caratteristiche, in questo ambito, che in realtà non possiede, mentre si sono trascurate altre caratteristiche, ben più importanti per in nostri climi che però, al momento, a causa dei ritardi nella ricerca e nella sperimentazione e anche per una dubbia impostazione concettuale e progettuale di fondo, non trovano ancora efficace e adeguata applicazione operativa.*

*Compito di Sergio Andri, in questo capitolo, è di fornire un quadro sufficientemente chiaro e succinto sull'attuale stato dell'arte, quadro utile anche per evitare di incappare in facili "bufale" e per rimanere con i "piedi per terra".*

### 7.1 Premessa

Nel giugno 2009 con il DPR 59 e le linee guida nazionali sulla certificazione energetica si è giunti ad un allineamento con gli altri Paesi europei in merito alle politiche di risparmio energetico nel settore abitativo.

Pur riconoscendo l'importanza della normativa e degli strumenti di calcolo oggi esistenti, questa novità ha portato con sé anche delle contraddizioni: l'impatto mediatico è stato tale da insinuare l'idea che la simulazione energetica di un edificio fosse la chiave d'accesso alla sostenibilità ed al costruire ecologico. Simili idee dovrebbero far sorridere. La sostenibilità in edilizia affonda le sue radici nell'architettura vernacolare, nella conoscenza del clima, nel rapporto equilibrato e consapevole delle forme e delle funzioni, nell'utilizzo intelligente dei materiali del luogo ecc. Sicuramente non è l'applicazione pedissequa di calcoli di trasmittanza, matrici di trasferimento o qualsivoglia altra procedura normata a garantire un'edilizia sostenibile. Questi sono degli strumenti che vanno sfruttati e valorizzati, ma non dovrebbero mai sostituire il buon senso e la cultura ad ampio spettro del progettista.

Il verde pensile è uno di quei settori che è stato portato alla ribalta dalla stessa normativa ma che, più di altri, rischia di pagare le conseguenze di un accanimento di calcolo ingegneristico, ereditato da applicazioni molto diverse e inadeguate al caso specifico.

Trattare l'argomento dei benefici energetici offerti dalle coperture a verde pensile è, quindi, un'operazione alquanto delicata.

L'atteggiamento di chi opera nel settore edilizio o di ricerca e si dedica al verde pensile va dallo scetticismo all'ottimismo spensierato di chi gli attribuisce una serie di ragionevoli vantaggi, senza però preoccuparsi di quantificarli o giustificarli. Nell'ambito della ricerca, ci sono molti contributi di grande qualità, ma spesso si riscontra un'eccessiva settorializzazione su questo argomento che ha, invece, un carattere estremamente trasversale.

Il risultato è, a volte, una scarsa attenzione alle esigenze del fruitore finale, il progettista, cui vengono offerti strumenti di calcolo troppo complessi, mentre altre volte ci si imbatte in ostinati tentativi di ricondurre anche il caso verde pensile alla rassicurante, ma apparente, solidità di un tradizionale modello energetico. O ancora si vedono ricercatori del ramo delle scienze biologiche seguire approcci puramente descrittivi ma disinteressati a contribuire ad un modello previsionale che, invece, è quanto mai necessario.

Tra queste correnti di pensiero si inserisce la normativa, che tenta di promuovere il verde sui tetti, ma senza riuscire a conciliare questi mondi ancora piuttosto distanti. La situazione appare perciò confusa e in divenire.

Non si vuole qui proporre un metodo affidabile e di facile applicazione per la valutazione energetica delle coperture a verde, che ancora non esiste, ma riassumere le conoscenze che, al momento, sembrano più interessanti e consolidate, rimarcandone anche i limiti.

Inoltre, si vuole apportare alcuni contributi tratti da studi di fisiologia vegetale sulla vegetazione a terra che in parte contraddicono alcune ricerche con impostazione ingegneristica perché si ritiene che possano contribuire allo sviluppo della disciplina e aprire la strada ad una più frequente collaborazione tra termotecnici e biologi.

Infine si vorrebbe motivare i progettisti a non valutare il verde pensile solo in base a parametri tecnici richiesti dalle normative attuali, ma a riconoscergli un'importanza che va ben al di là di quanto la normativa tecnica sia al momento capace di dimostrare.

Questa analisi verrà condotta per step successivi a partire da due delle principali caratteristiche di elementi opachi richieste dal DPR 59 (trasmissione stazionaria e periodica) per passare poi a considerazioni sul calcolo del fabbisogno energetico sia invernale che estivo.

## 7.2 Prestazioni termiche degli elementi edilizi

### *Trasmittanza termica stazionaria*

Il DLgs 311/2006 identifica la trasmittanza termica che determinati elementi edilizi devono rispettare. La trasmittanza dipende dalla conducibilità e dallo spessore del materiale. Per quanto riguarda la stratigrafia di un sistema per verde pensile, l'elemento di maggior importanza ai fini della conduzione del calore è dato dal substrato, il cui spessore è solitamente per diversi ordini di grandezza superiore ad altri elementi: filtro, piastre drenanti, feltri di accumulo e protezione e membrane impermeabili (naturalmente fa eccezione l'eventuale utilizzo di pannelli preformati drenanti realizzati in materiali isolanti come polistirene o poliuretano espansi, il cui contributo alla trasmittanza può risultare predominante anche con spessori ridotti).

Tuttavia le proprietà termiche del substrato non sono univocamente determinabili a causa della variabilità del contenuto idrico al suo interno, caratteristica

che, a differenza di quanto avviene per gli altri elementi edilizi, è costitutiva e necessaria allo svolgimento delle sue funzioni agronomiche.

Al momento non sono molte le misure di conducibilità termica effettuate su substrati. Si segnalano quelle di Sailor (2007) effettuate su una miscela di lapillo tipo pomice al 75% e sabbia al 25% (simile alle tipologie di substrato utilizzate dalle imprese italiane di settore), e quelle condotte da Manfred Kohler su diversi substrati commerciali delle principali aziende tedesche. I dati sono rappresentati rispettivamente nelle tabelle 7.1 e 7.2.

Contenuto idrico (%)	$\lambda$ (W/(mK))
0	0,17
11	0,20
22	0,24
55	0,34

Tab. 7.1 Variazione del coefficiente di conducibilità termica al variare del contenuto idrico. Tratto da Sailor, 2007

Contenuto idrico	$\lambda$ (W/(mK))
Secco	0,09 – 0,16
Saturazione	0,17 - 0,37

Tab. 7.2 Range di variazione del coefficiente di conducibilità termica, in diversi substrati commerciali specifici per coperture a verde riferiti rispettivamente a condizioni secche e a saturazione d'acqua. Tratto da Kohler, 2007

Come si può notare il substrato non si può considerare propriamente un isolante, tuttavia, con spessori che mediamente oscillano tra 10 e 20 cm, può comportare un contributo sensibile alla resistenza termica. Resta aperto però il problema del contenuto variabile d'acqua che influisce non poco sulla conducibilità del materiale. In un calcolo semplificato su base mensile o stagionale, si potrebbe fare riferimento ad un valore medio o al valore più cautelativo. Ulteriore fonte di errore è la inevitabile mancanza di uniformità nello spessore del substrato che riduce la resistenza termica reale. Questi problemi potrebbero venir superati solo attraverso una standardizzazione della metodologia di calcolo a livello normativo, in modo da rendere quanto meno confrontabili fra di loro diversi sistemi.

#### *Trasmittanza termica periodica*

L'articolo 17 del DPR 59/2009 stabilisce che il progettista, al fine di limitare i fabbisogni energetici per la climatizzazione estiva debba verificare che la trasmittanza termica periodica YIE delle pareti opache orizzontali ed inclinate sia inferiore a 0,20 W/(m<sup>2</sup>K). Gli effetti positivi che si ottengono con il rispetto dei valori di trasmittanza termica periodica delle pareti opache possono essere raggiunti, in alternativa, con l'utilizzo di tecniche e materiali, anche innovativi,

come le coperture a verde, che permettano di contenere le oscillazioni della temperatura degli ambienti sottostanti. In tal caso deve essere prodotta un'adeguata documentazione e certificazione delle tecnologie e dei materiali che ne attestino l'equivalenza con le predette disposizioni.

Questo articolo dunque riconosce la funzione di contenimento del carico termico estivo del verde pensile, ma chiede di documentarne l'equivalenza sulla base di metodi che sono stati elaborati per materiali comunemente utilizzati in edilizia. Purtroppo i sistemi a verde pensile hanno caratteristiche molto differenti.

Per la definizione della trasmittanza termica periodica, si rimanda alla norma ISO 13786, ma per i fini di questo capitolo basta sapere che l'YIE viene definita sulla base di un calcolo matematico a partire da determinati parametri di input, tra cui la densità, il calore specifico e la conducibilità termica del materiale. Nuovamente ci si ritrova ad operare con un tipo di materiale le cui caratteristiche variano in maniera sensibile in funzione del contenuto idrico, lasciando grande aleatorietà ai risultati del calcolo.

Se anche questi aspetti venissero chiariti e definiti, rimane la diffusa sensazione che questo tipo di calcolo non renderebbe giustizia ai sistemi a verde pensile proprio perché non terrebbe conto del contributo di smorzamento delle oscillazioni termiche dato dal passaggio di fase dell'acqua. Non bisogna dimenticare infatti che, sebbene la presenza di acqua sia peggiorativa, in quanto aumenta la conducibilità termica, questa possiede anche il calore latente di evaporazione più alto di qualunque sostanza conosciuta e il calore specifico più alto di qualunque sostanza, con l'eccezione dell'ammoniaca liquida.

Inoltre il valore di trasmittanza termica periodica, così come definito dalla norma, non può in alcun modo tenere conto della presenza della vegetazione, il cui contributo, come si dirà in seguito è di primaria importanza nel contenimento del carico termico estivo.

### 7.3 Fabbisogno energetico invernale ed estivo

La valutazione della trasmittanza termica stazionaria e periodica degli elementi edilizi rappresenta uno strumento utile per mettere a confronto in maniera semplice differenti soluzioni costruttive, ma contiene, in realtà, poca informazione. Di ben maggior interesse risulta la stima del fabbisogno energetico di un edificio, che tiene conto di tutte le caratteristiche dell'edificio nel suo complesso, del suo utilizzo e delle condizioni climatiche. In questo caso, il calcolo si fa notevolmente più complesso, tanto più se si tiene conto anche della vegetazione.

Allo stato attuale vi sono previsioni e dati alquanto contraddittori sulle prestazioni del verde pensile.

Uno studio non pubblicato condotto da Bass nel 2005 all'Università di Toronto su coperture con 30 cm di substrato e una densa vegetazione di specie di Ju-

niperus ha rilevato notevoli vantaggi energetici legati soprattutto alla drastica riduzione della velocità dell'aria a contatto con il tetto e, quindi, degli scambi convettivi. Per quanto però i venti possano essere forti, risulta impossibile che la sola riduzione dell'adduttanza superficiale renda conto di grosse differenze a livello di risparmio energetico.

Numerosi dati sono stati raccolti anche da Kohler (2007), i quali sostengono che il contributo di una copertura a verde pensile è confrontabile con un ulteriore strato di isolante di spessore dai 6 ai 16 cm, con un conseguente risparmio energetico invernale. Tali ricerche, inoltre, hanno evidenziato la capacità del verde pensile di eliminare quasi totalmente le oscillazioni di temperatura sulla faccia esterna quando le temperature oscillano attorno agli zero gradi, aspetto alquanto interessante anche perchè permette al tetto di lavorare in condizioni stazionarie quasi perfette. Ciò nonostante le fasi di transizione di gelo o disgelo e i periodi con temperature estremamente rigide con presenza costante di ghiaccio nel terreno rappresentano ancora dei casi di difficile rappresentazione teorica.

Secondo gli studi di Sailor (2008), è da prevedere un effetto leggermente negativo del verde pensile sul tetto dovuto proprio all'ombreggiamento dato dalla vegetazione ed al conseguente mancato guadagno solare che risulta, secondo l'autore, più rilevante rispetto all'aumento di resistenza termica.

Il gruppo di ricerca guidato da Castellotti individua un'altra criticità interessante del sistema durante il periodo invernale, sostenendo che, anche in assenza di vegetazione traspirante e anche a temperature piuttosto basse, il rateo di evaporazione dal suolo risulta abbastanza alto, a causa della elevata differenza di pressione di vapore tra l'aria esterna e quella negli interstizi del substrato. Il fenomeno meriterebbe ulteriori studi e soprattutto delle misure dirette per verificare l'entità dell'evaporazione.

Per quanto riguarda, invece, il periodo estivo, il verde pensile ha dimostrato di ridurre in determinate condizioni i consumi per il condizionamento estivo fino al 25% per effetto combinato di ombreggiamento e raffreddamento evaporativo (Berghage et al., 2007).

Castellotti individua un effetto benefico dato da una copertura a Sedum: in presenza di un basso contenuto di acqua, il sistema a verde pensile riduce il flusso di calore entrante del 60% rispetto ad un tetto di cemento con leggero isolamento di 4 cm, mentre con substrato ben idratato provoca addirittura un leggero flusso di calore uscente. Le osservazioni empiriche vengono accompagnate dall'elaborazione di un interessante modello sui flussi di calore attraverso tutta la copertura, con particolare attenzione al substrato dove viene analizzato anche il processo evaporativo.

In studi svolti in Germania, una vegetazione costituita da una miscela di specie erbacee permetteva di ottenere temperature sotto al substrato da 2 a 7 °C più fresche rispetto all'aria sovrastante la vegetazione (Kolb & Schwarz, 1999).

I modelli matematici previsionali che fino a questo punto si è tentato di sviluppare, pur dimostrando una grande raffinatezza e complessità, richiedono ancora di migliorare l'affidabilità e la semplicità d'utilizzo.

In diversi modelli la rappresentazione della componente vegetale o dei flussi idrici nel sistema suolo-pianta-atmosfera risulta ancora inesatta o complicata.

In alcuni casi, ad esempio, si tenta di stimare anche la conduzione del calore dalla foglia al substrato attraverso la pianta. Da un lato può essere apprezzabile che un modello ricerchi un simile livello di dettaglio da valutare il calore trasportato attraverso un conduttore di legno di sezione alquanto ridotta, lunghezza di svariati centimetri, all'interno del quale vi è un lento flusso di acqua controcorrente e dove la differenza di temperatura fra i due estremi del conduttore raggiunge più o meno i 10-15 K. Ciò non di meno una valutazione di questo tipo richiederebbe la conoscenza dell'effettiva lunghezza del conduttore e della superficie di contatto tra la radice e il substrato, dati impossibili da valutare a priori e che potrebbero ben giustificare la scelta di trascurare questo contributo.

Altro esempio è offerto dal bel modello suggerito da Castellotti per descrivere i flussi di calore e l'evaporazione nel substrato: purtroppo in questo non compare in maniera esplicita la resistenza al passaggio di vapore del substrato. L'aspetto non è di poco conto, è noto infatti che, in seguito alla disidratazione superficiale del terreno, la resistenza alla diffusione del vapore acqueo può aumentare in modo importante e limitare l'evaporazione diretta dal suolo. Inoltre la stessa presenza di una folta vegetazione, provocando un aumento dell'umidità relativa nello strato d'aria adiacente, riduce in modo sensibile la forza traente e, quindi, l'evaporazione diretta dal substrato.

Altri problemi insorgono nel momento in cui si tenta di valutare l'attendibilità dei sotto-modelli utilizzati, ereditati dall'ecologia o dalla biologia. Questi hanno solitamente un ambito di applicazione piuttosto limitato e difficilmente possono essere coordinati tra di loro.

Si prendano, ad esempio, i modelli che descrivono la traspirazione fogliare: questi si basano principalmente sulla conducibilità stomatica e sulla temperatura ed umidità dell'aria. Non vengono però tenute in conto le variazioni della conducibilità stomatica che nelle piante superiori è fortemente regolato. In effetti risulterebbe impossibile tenerne conto, visto che il controllo stomatico è soggetto ad una quantità innumerevole di segnali ambientali ed interni alla pianta: stato idrico nella foglia, stato idrico delle radici, conduttanza xilematica, cavitazione, quantità e qualità della luce, concentrazione di  $CO_2$  nel mesofillo, rateo di fotosintesi, bilancio energetico...

A scopo esemplificativo, il modello di Energy Plus prevede che nelle ore centrali della giornata la traspirazione e il "potere refrigerante" dovuto al passaggio di fase dell'acqua siano massimi e che il contenuto d'acqua nel substrato subisca una rapida riduzione. Ma se si potesse andare a misurare la conduci-

bilità stomatica in una tipica vegetazione arbustiva mediterranea, si scoprirebbe che nelle ore centrali di una giornata estiva le piante risparmiano la risorsa idrica: gli stomi sono spesso completamente chiusi e la traspirazione quasi trascurabile.

L'evapotraspirazione viene frequentemente additata come uno dei meccanismi più rilevanti nel regolare l'input energetico sul tetto. Il "raffreddamento" dovuto al passaggio di stato dell'acqua è in grado di assorbire 2.450 J per ogni grammo di acqua evaporata. Tuttavia, posto che la nostra capacità predittiva del processo di evapotraspirazione è molto scarsa e posto che una parte maggioritaria dell'energia radiante viene intercettata dallo "schermo vegetale", i ricercatori dovrebbero ripartire da una comprensione più profonda del bilancio energetico nelle foglie, in modo da non concentrarsi solo sul meccanismo di traspirazione e dissipazione energetica ma anche, e soprattutto, sulle necessità e i fini che le piante perseguono.

## 7.4 Bilancio energetico della vegetazione

La necessità della pianta sotto il profilo del bilancio energetico è in effetti presto detta: per sopravvivere, come tutti gli organismi viventi, deve regolare il bilancio tra l'energia assorbita, quella utilizzata e quella dissipata. Il surriscaldamento a 35-40 °C delle foglie comporta una notevole riduzione del rateo fotosintetico a causa della minore solubilità della CO<sub>2</sub> ad alte temperature (Schulze, 2005), dell'inattivazione della Rubisco (Sharkey, 2005) o di altri enzimi coinvolti nella sua rigenerazione (Wise et al., 2004) e della termolabilità del PS II (Foolad et al., 2007). Aumentando ancora di poco le temperature, si verificano danni irreversibili alle membrane cellulari ed alle strutture proteiche, causando in breve tempo la morte cellulare (Sharkey, 2005; Foolad et al., 2007). Per questo motivo, le piante sono dotate di diversi meccanismi di conversione dell'energia e possono regolarli finemente (Schulze, 2005) in modo da mantenere, per quanto possibile, le temperature dei propri tessuti all'interno di un intervallo compatibile con la loro sopravvivenza.

Secondo Walker (1992), a un'intensità di 800  $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$  una parte dell'energia disponibile, compresa tra il 10% ed il 50%, viene utilizzata per la fotosintesi cioè riconvertita in energia chimica di legame nel processo di organizzazione dell'anidride carbonica. Ma in una giornata soleggiata, su un tetto non ombreggiato, a latitudini corrispondenti al nord Italia, si possono registrare intensità luminose superiori a 1.500  $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$  e il rendimento del processo fotosintetico è destinato a scendere. Secondo Nobel (2005) solo l'1% dell'energia che giunge sul globo ogni anno viene convertito in prodotti fotosintetici, il resto deve venir altrimenti dissipato per evitare che il suo eccesso provochi danni alle strutture cellulari. L'energia luminosa non utilizzata per la fotosintesi viene trasformata in calore sensibile (Demmig-Adams, 2006), dissipato poi attraverso

vari meccanismi. I principali sono l'irraggiamento, gli scambi convettivi con l'aria e la conversione in calore latente di evaporazione (se la pianta dispone di sufficienti riserve idriche). Esistono anche altre strategie che agiscono a diversi livelli del bilancio termico, quali la regolazione dell'albedo delle foglie, che arriva a riflettere in certe specie il 70% della luce incidente (Ehleringer, 1982) o l'utilizzo dell'energia in reazioni chimiche diverse dall'assimilazione, come la fosforilazione ciclica o la fotodistruzione mirata di alcune proteine (Walker, 1992).

Lungi dal voler entrare in questioni troppo specifiche, estranee allo scopo di questo libro, con questa sfilza di considerazioni si vuole semplicemente sottolineare alcuni concetti fondamentali:

1. lo scopo della vegetazione non è raffreddarsi o raffreddare l'ambiente, ma unicamente dissipare l'energia in eccesso;
2. la traspirazione ha un ruolo importante nel regolare il bilancio energetico, ma non esclusivo! Non si spiegherebbe altrimenti la già citata capacità di alcune piante di sopravvivere e mantenere la temperatura delle foglie a temperature fisiologiche nelle ore centrali delle giornate estive senza traspirare;
3. il modo in cui le piante dissipano l'energia è, in linea di massima, di scarso interesse, l'aspetto importante è che la temperatura delle foglie si mantiene, durante il giorno, all'interno di un range piuttosto ristretto di temperature, indicativamente di poco inferiori ai 35 °C;
4. se si trascura la capacità termica delle lamine fogliari e la conduzione del calore attraverso il fusto, affinché la temperatura della foglia rimanga pressappoco costante, bisogna ammettere che tutta l'energia intercettata viene riflessa, convertita in energia chimica, convertita in calore latente di evaporazione o ceduta al flusso d'aria che lambisce le piante. Questo perché la chioma di una pianta, con grande superficie e ridottissima massa, è uno scambiatore di calore ad alto rendimento.

Il fatto che la traspirazione sia da considerare un meccanismo di refrigerazione del tetto era stato già criticato da Onmura et al. (2001), i quali avevano osservato che l'effetto refrigerante dell'evapotraspirazione predomina a livello delle superfici fogliari, dove si ha fisicamente il passaggio di stato e, quindi, la conversione del calore sensibile in calore latente. Il cosiddetto raffreddamento sottostante sarebbe piuttosto da considerare come un mancato riscaldamento.

In ogni caso, perché i meccanismi di dissipazione (di qualunque tipo essi siano) abbiano effetto sul contenimento del carico termico sul tetto e possano tornar utili ai fini di una modellizzazione matematica, è fondamentale che la vegetazione possa intercettare la maggior quantità di luce possibile e un'elevata densità della copertura vegetale ha un ruolo preminente in tal senso.

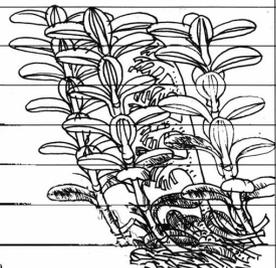
Kumar e Kaushik (2005) avevano infatti già rilevato che l'indice di area fogliare (LAI) e lo spessore totale degli strati di foglie sovrapposti costituivano un

aspetto fondamentale per ridurre le temperature sul tetto. Chih-Fang Fang (2008) propone, come semplificazione, di considerare la percentuale di copertura vegetale sul suolo al posto del LAI, che oltretutto risulta difficilmente determinabile per le piante succulente. Un modello sviluppato su questi presupposti indicava che l'indice di copertura e l'indice di spessore fogliare agiscono in maniera complementare nel ridurre il flusso di calore sul tetto e per ottenere una riduzione superiore al 90% dell'input energetico sono necessari contemporaneamente elevate coperture ed elevato spessore della chioma.

Un substrato non vegetato o con vegetazione scarsa, mantenuto umido, sarebbe probabilmente in grado di dissipare, comunque, una discreta quantità di energia per evaporazione, ma la perdita di acqua e la conversione di energia non godrebbe dell'importante effetto regolativo delle piante, possibile invece con vegetazione folta (Kelliher et al., 1995).

Cosa si può dire invece del contributo della vegetazione in inverno? Il discorso in questo caso è largamente aperto, in quanto in periodo invernale la vegetazione può essere dormiente, sempreverde o completamente spoglia o secca, ricoperta o meno da una coltre di neve.

Quello che sicuramente va evidenziato è che in inverno vi è tipicamente un deficit nel bilancio dell'energia radiante cioè l'energia dispersa è superiore a quella assorbita. Da questo punto di vista bisognerebbe valutare la capacità della coltre vegetale di limitare il raffreddamento notturno, oltre che di limitare l'assorbimento diurno.



	<i>h. dal suolo</i>	<i>umidità aria</i>	<i>temp. mass.</i>	<i>veloc. vento</i>
	200 cm	50%	12°	16 m/s
	3 cm	55%	17°	1 m/s
	2 cm			
	1,5 cm	70%	22,5°	0,2 m/s
	1 cm			0
	±0 cm	90%	47,5°	±0 m/s

Fig. 7.1 Ecoclima in un *Loiseleurietum* tratto da Cernusca, 1976

Uno spazio boschivo mantiene, durante la notte, temperature più elevate rispetto ad una zona aperta (Sukachev & Dyls, 1964) poiché il fogliame costituisce uno schermo che riduce il raffreddamento del suolo per irraggiamento.

Riguardo la capacità della vegetazione di proteggere la copertura dal vento creando un effetto "maglione", bisogna ammettere che poche ricerche sono state fino ad

ora condotte. Alcune osservazioni sono state condotte da Cernusca (1976) su un *Loiseleurietum*, associazione vegetale a spalliera, molto densa, che colonizza i margini ventosi dei pascoli alpini. I risultati riportati in tabella mostrano la grande capacità di questo tipo di vegetazione di isolarsi molto bene dall'esterno, limitando gli scambi di calore e di vapore acqueo. Infatti, mentre il microclima dell'aria risulta freddo e ventoso appena sopra il tappeto vegetale, il microclima all'interno della vegetazione risulta addirittura "subtropicale".

In definitiva la questione della climatizzazione invernale fornita dal verde pensile è un argomento assolutamente aperto, che richiede un approfondimento. In questo non bisognerebbe dimenticare l'utilizzo storico di queste coperture nei paesi scandinavi: se avesse comportato dei sensibili deficit termici nel periodo invernale, difficilmente avrebbe potuto tramandarsi come tecnica costruttiva per tanti secoli.

## 7.5 Acqua e prestazioni termiche

L'opinione diffusa che l'effetto refrigerante estivo sia dovuto quasi esclusivamente all'evapotraspirazione, ha spinto diversi sistemi per verde pensile a incrementare l'accumulo d'acqua utilizzando pannelli preformati d'accumulo con capacità di molti litri a metro quadro in modo da poter sostenere una maggior evapotraspirazione o quantomeno aumentare l'autonomia idrica.

In effetti bisogna ammettere che un accumulo idrico di questo tipo induce un rateo di traspirazione dalla pianta notevolmente maggiore. Come detto in precedenza, infatti, l'apertura stomatica risponde in maniera direttamente proporzionale allo stato idrico degli organi vegetali. In un suolo naturale o in un substrato a piena saturazione idrica, il potenziale dell'acqua corrisponde approssimativamente a 0 MPa; durante il processo di disidratazione, questo diminuisce progressivamente, fornendo mano a mano un segnale alla pianta di deficit idrico crescente. La risposta della pianta alla progressiva disidratazione del substrato ed all'abbassamento del potenziale idrico nei suoi tessuti, consiste per l'appunto in una regolazione dell'apertura stomatica, che si è visto ha l'effetto di aumentare l'efficienza nell'uso dell'acqua. In altre parole, in presenza di leggero deficit idrico la pianta effettua un risparmio idrico e ricorre ad una serie di altri processi per dissipare l'energia in eccesso e mantenere il suo bilancio energetico.

L'acqua contenuta nelle vaschette, a differenza di quanto avviene nel substrato, è invece totalmente libera, e mano a mano che viene consumata, il suo potenziale si mantiene comunque prossimo a 0 MPa fino all'ultima goccia. Nessun segnale viene dato alla pianta e l'efficienza nell'uso dell'acqua rimane bassa.

Riprendendo la considerazione espressa da Onmura et al. (2001), è necessario segnalare che questo non si traduce in un maggior raffreddamento del tetto, ma solo in un maggior spreco d'acqua. Il processo di dissipazione avviene infatti a livello delle foglie e non del tetto, l'elevata traspirazione impedisce il ricorso ad altri meccanismi di dissipazione a costo zero e comunque l'intero processo resta esclusivamente finalizzato a mantenere la temperatura degli organi fotosintetici entro una certa soglia, non ad abbassarla quanto più possibile.

Oltretutto la strategia di accumulare grandi quantità d'acqua libera vanifica anche il tentativo di dare maggior autonomia idrica alla pianta, la quale mantiene il rateo di traspirazione più elevato possibile fino a quando si trova in condizioni di spinto deficit idrico, in modo talmente repentino da esacerbare lo stress subito.