



Ricerca di Sistema elettrico

## Sistemi vegetali e sostenibilità energetica: effetti sul microclima urbano

Ripa M. N., Muleo R., Recanatesi F., Speranza S., Mancinelli R.,  
Ruzzi M.



**DAFNE**  
**Dipartimento di**  
**scienze Agrarie e**  
**Forestali**

## SISTEMI VEGETALI E SOSTENIBILITA' ENERGETICA: EFFETTI SUL MICROCLIMA URBANO

Ripa M. N., Muleo R., Recanatesi F., Speranza S., Mancinelli R., Ruzzi M.  
Università degli Studi La Tuscia  
Dipartimento di Scienze Agrarie e Forestali (DAFNE)

Settembre 2016

### Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

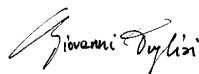
Piano Annuale di Realizzazione 2015

Area: Efficienza energetica e risparmio di energia negli usi finali elettrici e interazione con altri vettori energetici

Progetto: Tecnologie per costruire gli edifici del futuro

Obiettivo: Tecnologie "green" per gli edifici

Responsabile del Progetto: Giovanni Puglisi, ENEA



Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione "*Modelli di LCA per sostenibilità energetica e ambientale di coperture e/o pareti verdi di edifici*"

Responsabile scientifico ENEA: Carlo Alberto Campiotti

Responsabile scientifico Prof. Maria Nicolina Ripa

## Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE.....	5
2 STATO DELL'ARTE .....	6
3 PROGETTARE UNA COPERTURA VERDE: ASPETTI GENERALI DA CONSIDERARE.....	10
4 RADIAZIONE SOLARE E COPERTURE VEGETALI.....	17
4.1 LAI: DEFINIZIONI E METODI DI MISURA.....	21
4.1.1 <i>Architettura fogliare</i> .....	22
4.2 BILANCIO ENERGETICO SEMPLIFICATO .....	24
4.2.1 <i>Definizioni</i> .....	24
4.2.2 <i>Trasmissione del calore</i> .....	24
5 FLUSSI ENERGETICI SUI TETTI VERDI.....	29
6 PROPOSTA DI UN MODELLO.....	31
7 ESIGENZE IDRICHE DELLE COPERTURE VERDI.....	33
8 COLTIVAZIONE SENZA SUOLO (SOIL-LESS) PER LE COPERTURE VERDI.....	38
8.1 CONDUCEBILITÀ ELETTRICA, PH E COMPOSIZIONE DELLA SOLUZIONE NUTRITIVA .....	40
8.2 RIFORNIMENTO DEI NUTRIENTI NELLA COLTURA FUORI SUOLO. ....	43
8.3 I CONTROLLI DA COMPIERE E LA RISOLUZIONE DI EVENTUALI PROBLEMI .....	44
8.3.1 <i>Strategie innovative per la gestione della soluzione nutritiva in sistemi chiusi</i> .....	45
8.3.2 <i>Manutenzione degli impianti</i> .....	45
8.3.3 <i>Anomalie di funzionamento</i> .....	45
9 SPERIMENTAZIONI IN CORSO .....	47
9.1 ATTIVITÀ SPERIMENTALE 1: COLLABORAZIONE TRA UNIVERSITÀ LA TUSCIA ED ENEA CASACCIA .....	47
9.2 ATTIVITÀ SPERIMENTALE 2 : UNIVERSITÀ LA TUSCIA, DIPARTIMENTO DAFNE.....	48
10 CONCLUSIONI .....	50
11 BIBLIOGRAFIA .....	51
12. BREVE CURRICULUM SCIENTIFICO DEL GRUPPO DI LAVORO.....	52
13. ABBREVIAZIONI ED ACRONIMI .....	54

## Sommario

L'integrazione di vegetazione all'interno delle città densamente costruite, consente di sfruttare le superfici del patrimonio edilizio per migliorare le condizioni ambientali in ambito urbano e, in questo modo, di contribuire alla riqualificazione energetica delle città e al raggiungimento degli standard europei in accordo con gli obiettivi del protocollo di Kyoto e delle Direttive Europee sulla Efficienza Energetica. Le coltri vegetali sviluppate sia in orizzontale (tetti verdi) che in verticale (pareti verdi) agiscono sia da schermo per la radiazione incidente sull'edificio sia da strato isolante in quanto consentono di intrappolare l'aria compresa tra la vegetazione e la parete e quindi limitano lo scambio termico convettivo tra l'edificio e l'ambiente circostante. Inoltre, attraverso la evapotraspirazione del sistema vegetale dalle favoriscono la dissipazione di energia solare e, in questo modo, contribuiscono alla creazione e al mantenimento del comfort ambientale. Nell'ambito dell'accordo di collaborazione tra ENEA e Dipartimento di Scienze Agrarie e Forestali, nel periodo luglio 2016-agosto 2016, il gruppo di ricerca del Dipartimento DAFNE dell'Università degli Studi della Tuscia (Viterbo) ha svolto una attività di ricerca strutturata sulla base delle seguenti fasi:

- Analisi bibliografica ed elaborazione dello stato dell'arte relativamente alle essenze vegetali, soprattutto "autoctone", potenzialmente capaci di contribuire al miglioramento della sostenibilità energetica ed ambientale degli edifici.
- Analisi delle principali variabili microclimatiche che condizionano l'applicazione e lo sviluppo del sistema vegetale nei confronti dell'elemento costruito (edificio), con riferimento a: tecnica di coltivazione, modalità di ancoraggio all'edificio, tipologia di sistema di supporto, ciclo vegetativo (sempre-verde o deciduo), esigenze di acqua, suolo e nutrienti.
- Elaborazione di "linee guida" per le essenze vegetali sugli edifici in termini di esigenze nei confronti della necessità di acqua, luce e suolo e delle caratteristiche di collocazione e sviluppo bio-fisiologico ed agronomico ai fini della individuazione delle migliori soluzioni per migliorare la climatizzazione degli edifici nei periodi di caldo intenso.
- Illustrazione tecnica sui sistemi di idroponica per la installazione e/o integrazione di coltri vegetali di tipo estensivo ed intensivo nella struttura edilizia.
- Modello dei flussi energetici che si stabiliscono tra la radiazione solare incidente e la tipologia Tetto Verde, in relazione sia al LAI (Leaf Area Index) e sia agli scambi energetici tra la copertura e l'edificio.
- Analisi ed interpretazione critica dei primi dati scientifici raccolti e dei risultati.

## 1 Introduzione

Il verde è da sempre un elemento di progetto nell'architettura degli edifici e nel decoro urbano delle città, ma fino a poco tempo fa il suo utilizzo era soltanto a scopo decorativo. Oggi, invece, le realizzazioni di coperture verdi definite tecnicamente come **"Green Roof (GR)"** o **"Tetti Verdi"** e **"Green Walls (GW)"** o **"Pareti Verdi"**, vengono considerate un vero e proprio componente edilizio. L'integrazione di vegetazione all'interno delle città densamente costruite consente di sfruttare le superfici (orizzontali e verticali) del patrimonio edilizio per migliorare le condizioni ambientali in ambito urbano e, in questo modo, di contribuire al miglioramento del microclima urbano, alla riqualificazione energetica degli edifici e al raggiungimento degli standard energetici europei in accordo con gli obiettivi del protocollo di Kyoto e delle Direttive Europee sulla Efficienza Energetica. Le superfici degli edifici possono raggiungere temperature che superano quelle dell'aria anche con valori che vanno dai 10 °C ai 40 °C, con effetti negativi sia sul comfort degli edifici che rispetto all'ambiente urbano in termini di eccessivo riscaldamento di particolari aree cittadine e la conseguente manifestazione del fenomeno delle *"Isole di Calore"* [1].

La mitigazione della radiazione solare incidente sugli edifici e sui materiali impiegati per le costruzioni e le strutture edilizie risulta particolarmente efficace per la sostenibilità energetica durante i periodi di caldo intenso attraverso l'ombreggiamento e l'evapotraspirazione delle coperture verdi poste sulle superfici orizzontali e/o verticali dei fabbricati urbani. In generale, questo fenomeno è associato alla radiazione solare nei suoi diversi aspetti fisici, tra i quali prioritari risultano : l'assorbimento della radiazione solare e l'aumento del calore immagazzinato dalle strutture dell'edificio, il blocco del re-irraggiamento notturno verso la volta celeste a temperature inferiori, il basso indice di evapotraspirazione dovuto alla scarsa presenza di vegetazione. Inoltre, le coltri vegetali agiscono da strato isolante per la parete dell'edificio, aumentando il valore di R (in edilizia, R è un valore che misura l'efficacia di isolamento, ad un valore elevato di R corrisponde un livello di isolamento maggiore) ed intrappolando l'aria compresa tra la vegetazione e la parete dell'edificio. Esse funzionano anche come un ostacolo del flusso d'aria sulla superficie dell'edificio e, in questo modo, limitano lo scambio termico convettivo con l'ambiente circostante. La maggior parte dell'energia solare assorbita dalle piante e dalle foglie può essere evaporata attraverso il fenomeno della evapotraspirazione come energia latente e, in questo modo, la dissipazione di energia solare attraverso l'attività fisiologica delle piante contribuisce al raffreddamento della foglia e dell'ambiente confinante. L'evapotraspirazione, definisce sia l'evaporazione che costituisce il fenomeno fisico per cui l'acqua passa dallo stato liquido allo stato di vapore dal suolo all'atmosfera e sia la traspirazione che è il processo mediante il quale le piante regolano l'eliminazione di acqua dalle foglie e dai tessuti vegetali al fine di mantenere una temperatura fogliare funzionale per i propri processi metabolici e fotosintetici alla base della crescita e sviluppo vegetale (mediante nei sistemi vegetali realizzati su substrato l'evaporazione è dovuta per il 10% al substrato e 90% alla superficie fogliare della pianta).

Mediamente, l'evaporazione di un litro di acqua vale circa 2500 KJ in termini di dissipazione termica, in relazione al clima, alle caratteristiche biologiche ed agronomiche delle essenze vegetali e al sistema di irrigazione e coltivazione. In ultima analisi, il fenomeno della evapotraspirazione di 1 m<sup>3</sup> di acqua da una copertura vegetale, consente un consumo di energia fino a 700 kWh, pari a circa 2-3 °C di raffreddamento dell'aria [2]. Recentemente, inoltre, la tematica delle coperture verdi all'interno dell'ambito urbano comincia ad essere interpretata anche in accordo con la realizzazione di orti urbani posti sulle superfici degli edifici, spesso integrati in edifici di grande spessore architettonico. La pratica della coltivazione orticola sulle superfici orizzontali degli edifici (tetti verdi) e/o verticali (pareti verdi) presenta delle interessanti potenzialità, in quanto permette di sfruttare per l'autoproduzione superfici o ritagli di superficie (logge, balconi, facciate o terrazze, soprattutto nel caso in cui l'edificio non disponga di uno spazio aperto orizzontale dove provvedere a tale funzione. Questa attività accade soprattutto nelle metropoli dei paesi più ricchi ma anche di quelli del terzo e quarto mondo. Il fenomeno dell'agricoltura verticale è in continua espansione nel mondo ed è presente ormai anche in molte città d'Italia. L'introduzione delle coperture vegetali, rappresenta una soluzione particolarmente sostenibile e di notevole importanza ai fini del miglioramento della situazione microclimatica delle aree urbane se

consideriamo la potenzialità degli elementi vegetali nella mitigazione del fenomeno più generale del *global warming*, la necessità di riequilibrare il ciclo dell'acqua meteorica e la regimazione dell'afflusso delle acque piovane verso le reti di drenaggio urbano, la riduzione dei fabbisogni energetici degli edifici, soprattutto nel raffrescamento estivo, la riduzione delle emissioni di CO<sub>2</sub> e il contributo a filtrare la quota delle polveri inquinanti oltre che incrementare la biodiversità e la riqualificazione dello skyline urbano. Infine vengono anche riconosciuti dei benefici estetici per gli edifici e psicologici per i cittadini.

## 2 Stato dell'arte

Le attività progettuali hanno preso in considerazione soprattutto gli aspetti energetici del tetto verde (Green roof) che rappresentano una superficie edilizia ricoperta da specie vegetali, coltivate direttamente sui terrazzi e/o balconi degli edifici. La tecnologia di sistema vegetale integrato può essere realizzato in due modi: estensivo o intensivo m<sup>2</sup>. La tipologia **estensiva** è un sistema di copertura vegetale che richiede una manutenzione ridotta con piante a sviluppo contenuto in altezza e con caratteristiche di veloce radicamento e copertura, resistenza alla siccità e al gelo, buona autorigenerazione e auto-propagazione. Si possono impiegare con successo numerose erbacee perenni. Lo spessore del substrato di coltivazione è, normalmente, realizzato con substrati a bassa densità e ridotta profondità: a partire da circa 8 cm, che rappresentano il minimo nelle nostre condizioni climatiche per il genere *Sedum*, fino a circa 15 cm in funzione delle esigenze delle specie adottate. Le tipologie di sistema vegetale estensivo si prestano ad essere applicati sia alle nuove costruzioni che al rinnovamento o alla riqualificazione di vecchi edifici. In generale, le coperture verdi estensive, quando realizzate in funzione di tetto verde, non possono sopportare carichi superiori a 120 kg/m<sup>2</sup> mentre se disposti su superfici inclinate (mediamente tra 10° e 30°) si può arrivare anche a carichi di 200 kg/m<sup>2</sup>. Nel caso di giardino pensile sulla struttura dell'edificio si deve prevedere un sovraccarico di 400-750 kg/m<sup>2</sup>, contro i 60-250 kg/m<sup>2</sup> del "tetto verde estensivo". In questo caso, tuttavia, si richiedono progettazioni più articolate e complesse per le coperture a verde che includono sistemi di trattenimento, ancoraggi, sistemi per il drenaggio e per gli scarichi dell'acqua.

La tipologia di tetto verde **intensivo**, invece, rappresenta un giardino pensile vero e proprio, "classico", provvisto di prati, cespugli, alberi ed elementi di arredo come a terra. E' un sistema vegetale che richiede sempre una regolare manutenzione (sfalci, irrigazione, diserbi, concimazioni). Lo spessore del substrato è superiore ai 15 cm e normalmente non supera i 40 – 50 cm pur potendo, in casi particolari, superare anche i 100, 150 cm (nel caso di vegetazione arborea). Il substrato impiegato è costituito da una miscela bilanciata di elementi minerali e organici. Il peso delle stratificazioni in massima saturazione idrica è superiore ai 200 Kg/m<sup>2</sup>. Il peso massimo è determinato, oltre che dallo spessore del substrato, dal tipo di vegetazione e dalle soluzioni di arredo eventualmente inserite. L'inverdimento intensivo viene impiegato soprattutto per la realizzazione superficie pensili: tetti, terrazze e garage. Tra le diverse piante utilizzabili per i VGS e GR, di particolare interesse risulta la famiglia dei *Sedum*. In Italia per la realizzazione degli inerbimenti sia intensivi che estensivi si fa riferimento alla norma UNI 11235-2007 [3], recentemente aggiornata con la norma UNI 11235-2015. La norma considera il verde pensile un "sistema tetto" in tutta la sua completezza: vengono presi in considerazione tutti gli elementi che possono comporre una stratigrafia e ne vengono definiti i requisiti minimi. Tra questi elementi i seguenti, definiti primari, devono sempre essere presenti:

1. Elemento portante.
2. Elemento di tenuta dell'acqua.
3. Elemento di protezione all'azione delle radici (integrato o meno).
4. Elemento di protezione meccanica.
5. Elemento di accumulo idrico.
6. Elemento drenante.
7. Elemento filtrante.

8. Strato colturale.

9. Strato di vegetazione.

La norma, oltre alle istruzioni legate alla cantieristica, cioè all'esecuzione della copertura, ai controlli nell'esecuzione, ai parametri di collaudo e alla manutenzione, fornisce le specifiche e i criteri di calcolo riguardanti la composizione degli strati primari (portante, di tenuta, di protezione dall'azione delle radici, drenanti, filtranti, di accumulo idrico, strati colturali e di vegetazione, etc...) e di quelli secondari (strato di barriera a vapore, strato termoisolante, strato di pendenza, di protezione, di zavorramento, strato antierosione, impianti di irrigazione, etc...) indicando gli spessori minimi adatti in base al tipo di vegetazione. Il tetto verde costituisce un intervento tecnologico in grado di contrastare l'impermeabilizzazione del suolo, con l'effetto di rallentare attenuare i deflussi superficiali causati dall'acqua piovana. Infatti l'acqua rilasciata dalla copertura verde è sempre inferiore all'acqua che fuoriesce dal sistema stesso. La differenza è dovuta ai meccanismi di evaporazione del suolo e la traspirazione delle piante coltivate sul tetto verde. Il volume d'acqua che viene sottratto al deflusso superficiale dal substrato è chiamato "volume di ritenzione". Questo parametro, che si esprime mediante un valore numerico (coefficiente di deflusso), che indica il rapporto fra la quantità d'acqua rilasciata (deflusso) e la quantità d'acqua captata dalla superficie stessa (pioggia), è un numero compreso tra 0 e 1 e più si avvicina a un valore prossimo a 0 più la superficie è permeabile. Una copertura verde con strato colturale di 15-25 cm ha un coefficiente di deflusso pari a 0,30, il suolo, il suolo o un cortile, hanno un coefficiente di deflusso pari tra 0,10 – 0,20, un giardino, un orto o un' area verde valori tra 0 e 0,10. Da un punto di vista tecnico le prestazioni e la manutenzione di una copertura "tetto verde" sono simili a quelle del prato, anche se la manutenzione in fase iniziale è sicuramente più elevata. I fattori critici per la sopravvivenza delle piante e le caratteristiche principali di delle specie adatte alla coltivazione su tetti verdi sono riportati nella Tabella 1. Particolare rilevanza per i tetti verdi hanno le specie autoctone adattate ad ambienti estremi (pietraie, pareti rocciose, dune costiere, cave dismesse).

**Tabella 1 - Caratteristiche principali per l'individuazione delle specie vegetali per i tetti verdi**

Fattore	Risposta
Caratteristiche ambiente mediterraneo	Intensa radiazione luminosa, elevata temperatura, periodi siccità alternati a piovosità.
Substrato	Basso spessore
Irrigazione	Contenuta o scarsa
	Resistenza alla siccità, agli stress idrici, ai parassiti
	Facilità di propagazione e capacità tappezzante
	Velocità di crescita
	Apparato radicale non invasivo
Manutenzione	Relativamente bassa

E' possibile impiegare un'ampia gamma di specie e associazioni vegetali per i tetti verdi: tappeti erbosi, erbacee perenni, cespugli, alberi. Le tabelle 2-3-4 mostrano indicazioni su pesi e altezze degli inverdimenti estensivi ed intensivi [4].

**Tabella 2 - Inverdimento estensivo**

Tipo di vegetazione	Peso indicativo senza substrato (kg/m <sup>2</sup> )
<i>Sedum</i>	10
<i>Sedum</i> , erbacee perenni	10
Associazioni a prato arido	10
Associazioni a prato magro complesse	15
Erbacee perenni, piccoli arbusti	15
Erbacee perenni, piccoli cespugli fino a 1,5 m di altezza	20

**Tabella 3 - Inverdimento intensivo**

<b>Tipo di vegetazione</b>	<b>Peso indicativo della vegetazione senza substrato (kg/m<sup>2</sup>)</b>
Tappeti erbosi	5
Piccoli perenni e arbusti	10
Erbacee perenni e cespugli di 1,5 m di altezza	20
Cespugli fino a 3 m di altezza	30
Grandi cespugli fino a 6 m di altezza	40
Piccoli alberi fino a 10 m di altezza	60
Alberi fino a 15 m di altezza	150

**Tabella 4 - Piante di Sedum negli inverdimenti estensivi**

<b>Varietà</b>	<b>Altezza</b>
<i>Sedum album</i>	5-10
<i>Sedum cauticum</i>	10-15
<i>Sedum floriferum</i> 'Weihenstephaner Gold'	10-15
<i>Sedum hybridum</i> 'Immergrunchen'	10-15
<i>Sedum reflexum</i>	10-15
<i>Sedum sexangulare</i>	5-10
<i>Sedum spurium</i>	10-15

**Tabella 5 - Varietà di erbacee perenni impiegate negli inverdimenti estensivi**

<b>Varietà</b>	<b>Altezza</b>
<i>Achillea millefolium</i>	40
<i>Allium schoenoprasum</i>	20-40
<i>Anthemis tinctoria</i>	30-40
<i>Bromus erectus</i>	30-40
<i>Bromus tectorium</i>	30-60
<i>Campanula carpatica</i>	15-20
<i>Carex flacca</i>	10-25
<i>Centaurea cyanus</i>	30-50
<i>Dianthus carthusianorum</i>	40
<i>Dianthus deltoides</i>	20-25
<i>Dianthus plumarius</i>	25-30
<i>Echium vulgare</i>	30-40
<i>Festuca amethystina</i>	25-40
<i>Festuca ovina</i>	20-25
<i>Festuca rubra</i>	20-50
<i>Fragaria vesca</i>	20
<i>Geranium macrorrhizum</i>	20-30
<i>Hieracium aurantiacum</i>	10-30
<i>Heracium pilo sella</i>	10-15
<i>Koeleria glauca</i>	20-30
<i>Lavandola angustifolia</i>	40-60
<i>Linaria vulgaris</i>	20-60
<i>Origanum vulgare</i>	30-40
<i>Petrorhargia saxifraga</i>	10-20



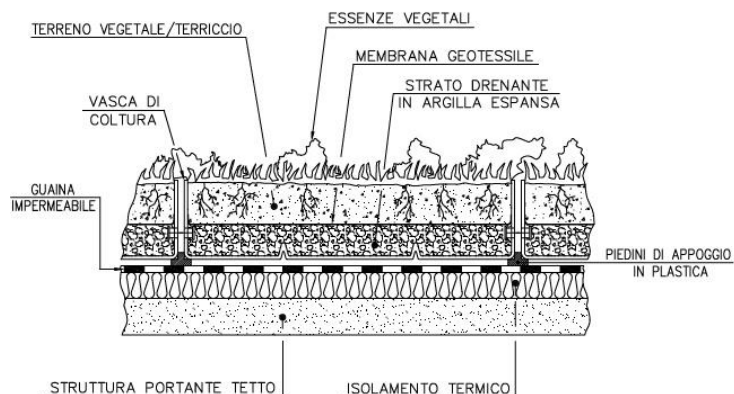
<i>Potentilla vernia</i>	5-10
<i>Prunella grandiflora</i>	10-15
<i>Salvia pratensis</i>	50
<i>Sangisorba minor</i>	60-80
<i>Saponaria ocymoides</i>	15-20
<i>Satureia montana</i>	30-40
<i>Sempervivum 'ibridi'</i>	10-20
<i>Teucrium chamaedrys</i>	10-20
<i>Thymus pulegioides</i>	5-30
<i>Thymus serpyllum</i>	5
<i>Thymus vulgaris</i>	20-30
<i>Verbascum phoeniceum</i>	30-50
<i>Waldsteinia ternata</i>	10-15

Di seguito (Tabella 6) i principali parametri da prendere in considerazione nella realizzazione di coperture verdi [5].

**Tabella 6 - Parametri per la scelta della tipologia di copertura verde**

	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>	<b>E</b>
TIPOLOGIA DI SUPPORTO	Intensivo pesante sp. substrato >30 cm	Intensivo leggero sp. substrato da 15 a 30 cm	Estensivo sp. substrato da 5 a 15 cm	Estensivo inclinato sp. substrato da 5 a 15 cm	Intensivo leggero inclinato sp. substrato da 15 a 30 cm
CARATTERISTICHE ARCHITETTONICHE	inclinazione <10°	inclinazione <10°	inclinazione <10°	inclinazione > 30°	inclinazione < 30°
CARATTERISTICHE STRUTTURALI	peso supportabile > 500 kg/m <sup>2</sup>	peso supportabile > 200 kg/m <sup>2</sup>	peso supportabile > 120 kg/m <sup>2</sup>	peso supportabile > 120 kg/m <sup>2</sup>	peso supportabile > 200 kg/m <sup>2</sup>
PRESTAZIONI MICROCLIMATICHE RICHIESTE	isolamento massa termica riduzione T aria riduzione T sup.	isolamento riduzione T aria riduzione T sup.	riduzione T sup.	riduzione T sup.	isolamento riduzione T aria riduzione T sup.
CARATTERISTICHE FORMALI E FUNZIONALI	accessibile visibilità alta irrigazione liv. manutenzione medio-alto	accessibile visibilità media irrigazione liv. manutenzione medio	non accessibile visibilità bassa liv. manutenzione basso	non accessibile visibilità bassa liv. manutenzione basso	non accessibile visibilità media irrigazione liv. manutenzione medio
SPECIE VEGETALI PORTAMENTO CICLO VEGETATIVO	arbusti alberature medie dimensioni prato sempreverde	arbusti medi prato sempreverde	<i>Sedum</i> prato sempreverde	<i>Sedum</i> prato sempreverde	arbusti piccoli prato <i>Sedum</i> sempreverde

In generale i substrati impiegati in entrambe le tipologie, sistemi vegetali estensivi e rispettivamente intensivi, sono costituiti da una miscela bilanciata di elementi minerali e materiale organico in modo da garantire un apporto di sostanze sufficienti per un corretto sviluppo dei vegetali.



**Figura 2 - Sistema di coltivazione su substrato**

Nella Figura 2, sopra riportata, partendo quindi dalla sommità del sistema vegetale (dove sono collocate le piante nel substrato) e procedendo verso il basso, si incontrano stratificazioni di diverso spessore. In particolare, il substrato di vegetazione fornisce alloggio alle radici della pianta, garantendo al contempo una serie di funzioni complementari, come peso ridotto ed elevata capacità drenante anche in condizioni di massima saturazione d'acqua, capacità di ritenzione idrica ed un adeguato rapporto aria/acqua al proprio interno, resistenza al gelo, stabilità di struttura fisica e chimica. I materiali utilizzati per comporre il substrato sono solitamente degli elementi a matrice terrosa (terriccio, argilla espansa, torba, humus, ecc.). Lo strato filtrante impedisce la discesa delle particelle fini del substrato nello strato sottostante, ossia quello drenante: fattore che ne limiterebbe parzialmente o totalmente le funzionalità. Esso dovrà inoltre poter accogliere l'ancoraggio degli apparati radicali. Le funzioni dello strato drenante hanno a che fare sia con la gestione della presenza idrica che nei confronti degli apparati radicali.

Tale tipo di stratificazione dovrà provvedere al drenaggio dell'acqua in transito nel substrato d'impianto, in quanto un ristagno della stessa potrebbe provocare l'asfissia delle radici: perciò anche l'aerazione degli apparati radicali dipenderà da esso. Ulteriore funzione esercitata sarà quella di accumulo idrico, dovendo lo strato drenante, nella propria parte bassa, accumulare dell'acqua di riserva da fornire agli apparati radicali nei momenti di maggiore stress idrico (dovuto ad esempio alla scarsità di precipitazioni meteoriche o conseguente ad eventuali guasti nell'impianto d'irrigazione). Nei casi di vasi e fioriere lo strato drenante viene solitamente realizzato in materiali sfusi che abbiano elevate capacità di ritenzione idrica e drenaggio). Lo strato di terra e vegetazione che si crea incrementa la resistenza e l'inerzia termica della struttura e consente di mantenere temperature superficiali inferiori alle temperature esterne grazie al fenomeno della evapotraspirazione producendo benefici sia nella stagione estiva che invernale. Il Tetto verde risulta particolarmente adatto a edifici con elevato rapporto tra la copertura del tetto e il volume riscaldato, sebbene i risultati positivi sono riscontrabili praticamente solo per l'appartamento di installazione.

### 3 Progettare una copertura verde: aspetti generali da considerare

La scelta delle specie vegetali da impiegare nelle coperture vegetali si basa oltre che sulla tipologia di struttura dell'edificio soprattutto sull'area geografica e sul clima del sito. Il tipo di supporto è importante per la tipologia di piante da utilizzare, si considera il portamento della pianta e cioè la relazione che la

pianta stabilisce con la crescita della sua parte aerea. Il portamento distingue le piante in rampicanti e striscianti. La crescita delle piante può essere differente se l'impianto è effettuato in terra o in vaso. In generale, per un utilizzo bioclimaticamente corretto nei climi caratterizzati dalla richiesta di raffrescamento (tardo autunno-inizio primavera) e di riscaldamento (tardo autunno-inizio primavera), sarebbe ideale che il ciclo di fogliazione-defogliazione si trovasse in fase con la domanda. A questo proposito si sottolinea che è fondamentale l'impiego di piante autoctone in quanto questa famiglia di essenze vegetali presentano un ciclo di fogliazione-defogliazione certamente in fase con la domanda di climatizzazione. Infine, non è secondario sottolineare che le specie con fogliazione caduca "marcescente" cioè che alla fine del ciclo di vegetazione mantengono una parte delle foglie secche fino alla primavera successiva e quindi hanno una percentuale di trasmissione della radiazione solare in inverno molto bassa. Una indicazione di massima operativamente molto pratica è scegliere piante a stagione vegetativa breve nei climi freddi e piante a lunga stagione vegetativa nei climi caldi ([6]. Di seguito si riportano ulteriori indicazioni per una scelta corretta.

#### Scelta delle specie:

- Adattabilità al clima locale,
- Resistenza e rusticità,
- Sviluppo in altezza e ampiezza fogliare,
- Rapidità di crescita,
- Piante perenni (le annuali vanno utilizzate al massimo in combinazione con le perenni),
- Sempreverdi, semi-sempreverdi e decidue,
- Piante possibilmente autoctone e in equilibrio con la vegetazione delle aree rurali circostanti.

#### Disposizione delle piante in base al sole

Disporre le piante in base:

- obiettivo (prestazione desiderata rispetto alle caratteristiche dell'essenza vegetale),
- esposizione dell'edificio.

Durante i mesi più freddi con il sole ad azimut minore è preferibile utilizzare piante decidue nell'esposizione assoluta (sud-sud-ovest) per permettere il passaggio della luce solare sulla superficie dei materiali dell'edificio contribuendo al suo riscaldamento e consentendo il passaggio dei raggi solari attraverso le finestre. Questa strategia è adatta in climi caldi e miti e nei climi mediterranei. Nei climi più freddi è preferibile l'installazione di piante sempreverdi anche per la maggiore brevità del periodo vegetativo della pianta, che non consentirebbe di raggiungere in breve tempo la copertura di ampie superfici.

#### Adattamento della pianta al tipo di installazione

La specie vegetale deve potersi ben adattare al tipo di supporto scelto. L'adattamento della specie vegetale al tipo di supporto è importante per la sua crescita e sviluppo e anche per la sua richiesta di manutenzione. Tutte le piante richiedono più o meno manutenzione a seconda ovviamente della specie e pianta. E' richiesto almeno un intervento annuale di:

- Potatura,
- Pacciamatura,
- Fertirrigazione,
- controllo del sistema di irrigazione e/o fertirrigazione.

Le esigenze idriche e nutritive per le piante in contenitori sono ovviamente più elevate. Con particolari attenzione ai climi più caldi e quelli più freddi. Le specie indigene offrono un maggior successo che si riflette nell'indice di massa fogliare e percentuale di copertura.

### Aspetti estetici

Ogni progetto “copertura verde” dovrebbe prevedere aspetti di fioritura e fruttificazione delle specie vegetali, possibilmente anche in periodi stagionali differenti. Le piante sempreverdi andrebbero associate alle piante decidue per assicurarsi un risultato oltre che climatico anche estetico nelle quattro stagioni.

### Realizzazione parete verde con supporti per rampicanti

Aspetti importanti per la realizzazione di pareti con specie vegetali rampicanti è la crescita in altezza e ampiezza definita dall'intensità fogliare (aspetti importanti ai fini delle loro prestazioni energetiche). La parte aerea della pianta, ossia la dimensione e la forma della chioma fogliare sono fattori importanti per una efficace funzione di schermatura della luce solare, limitare la velocità del vento, assorbire le polveri sottili e la CO<sub>2</sub>. Anche la forma e l'altezza della copertura vegetale e in generale il portamento, rappresentano parametri utili per il controllo della radiazione solare in quanto determinano l'area potenziale di schermatura. Per quanto riguarda le piante rampicanti per pareti verdi, queste sono selezionate in base al modo in cui si ancorano al supporto. Si distinguono tre categorie principali:

**Volubili** : i fusti inizialmente sono dritti, a contatto con un sostegno si attorcigliano seguendo un modello elicoidale normalmente destrorso come per esempio le piante di Ipomee, Caprifoglio e il glicine. Questa categoria di piante presenta anche appositi organi di adesione, foglie e anche fusti trasformati, come i cirri, ossia filamenti sottili che avvolgono il supporto, comune nelle leguminose. Altri esempi sono i viticci della vite, e i dischi adesivi del *Partenocissus*. glicine, il caprifoglio, il kiwi, il caprifoglio del Giappone, la campanella rampicante e il fagiolo. (bouganville volubili e sarmentose)

**Aggrappanti**: sono specie che sviluppano particolari organi che le consente di rimanere ancorati al loro supporto. Esempi sono: *Ficus pumila* e *Edera helix*, o anche utilizzano le spine come *Smilax aspera*.

**Sarmentose**: piante non strettamente rampicanti , anche se in parte volubili come *Jasminus nudiflorum* (gelsomino di San Giuseppe) il rovo e il lampone, che crescono grazie alla presenza di punti di appoggio, non di adesione, senza punti di appoggio assumono un portamento più ricadente, tra questa tipologia di piante rientrano molte rose dette rampicanti ma che in realtà sono sarmentose. In natura tuttavia, sono tanti i rampicanti che presentano più di una tipologie di crescita in contemporanea.

Le piante rampicanti vengono inoltre suddivise in tre categorie:

**Rustiche**: capaci di sopportare basse temperature e periodi di gelo es: *Clematis montana*

**Semirustiche** che sopportano brevi e occasionali periodi di gelo (*Akebia quinata*, *Plumbago auriculata*, *Trachelospermum jasminoides*).

**Delicate**: non tollerano il freddo e vengono fatte svernare in serra o in casa come molti rampicanti e come molte piante esotiche e mediterranee.

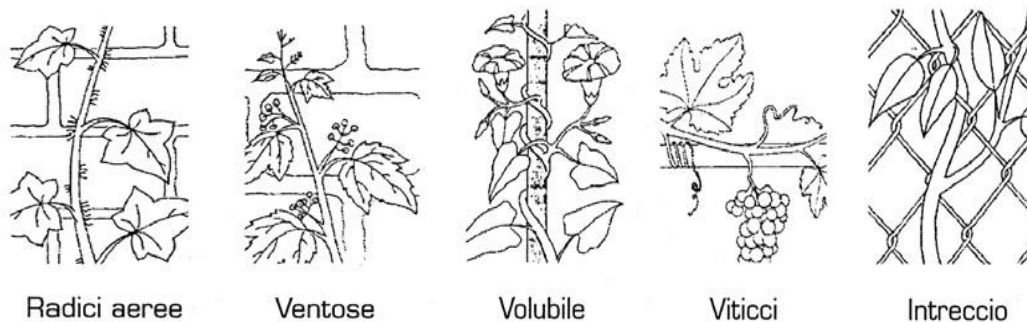
### Misura della crescita dei rampicanti.

Un elemento da non sottovalutare quando si progettano coperture verdi da integrare nelle strutture costruite è costituito sicuramente dalla conoscenza delle caratteristiche di crescita e sviluppo delle essenze vegetali che si vogliono utilizzate soprattutto rispetto ai tempi di crescita e alle esigenze di acqua. Per quanto riguarda il primo fattore, la crescita delle piante rampicanti, così come per le piante arboree o cespugliose, si misura convenzionalmente in cm/anno e può variare, a seconda della specie prescelta, tra 50 e 200 cm/anno. In particolare i tempi di crescita, generalmente, vengono classificati secondo la seguente scala di valori in cm/anno:

- Rapido: > 200 cm/anno ,
- Veloce: 100-200 cm/anno ,
- Medio: 50-100 cm/anno ,

- Lento: < 50 cm/anno.

Rispetto alle necessità idriche, invece, è opportuno sempre selezionare piante con esigenze idriche in linea con l'andamento delle precipitazioni del sito che accoglie il progetto vegetale e che, solitamente, si considerano elevate (superiori a 1500 mm/anno), medie (800-1500 mm/anno), e scarse (800 mm/anno). Per quanto riguarda le pareti verdi verticali (Green Walls), le specie vegetali impiegate fanno riferimento soprattutto ad essenze rampicanti e/o ricadenti, aggrappate direttamente o indirettamente, tramite supporti verticali o orizzontali di sostegno alla muratura dei fabbricati (Figura 3).

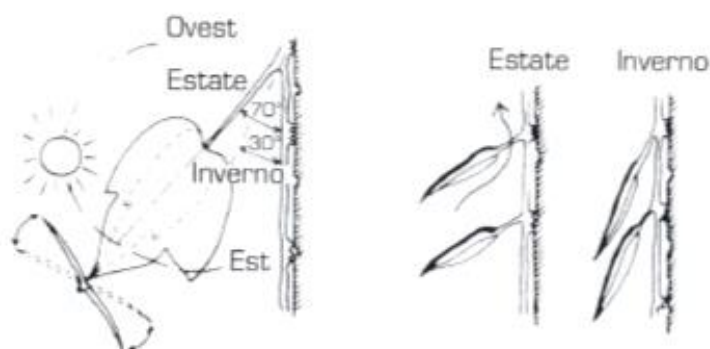


**Figura 3 - Modalità di ancoraggio e/o di sostegno dei rampicanti. Piante che si auto-sostengono aggrappandosi direttamente alle superfici mediante proprie radici aeree o ventose.**

Le caratteristiche fogliari, forma e dimensioni, influenzano le prestazioni energetiche della vegetazione impiegata per le coperture verdi. Infatti, le foglie a lamina piana ombreggiano maggiormente e grazie al fenomeno del fototropismo che gli consente di disporsi secondo l'inclinazione della radiazione solare, riescono a catturare una maggiore quota di energia per i processi fotosintetici. Invece le foglie ad ago presentano una maggiore resistenza al vento e all'inquinamento ma risultano meno efficaci per schermare la radiazione solare. Sotto l'aspetto della schermatura le specie vegetali migliori sono quelle che presentano una percentuale di trasmissione della radiazione solare incidente inferiore al 15% e, contemporaneamente, presentano una traspirazione giornaliera non inferiore a 8 grammi di acqua per grammo di foglia verde. Un ulteriore parametro da prendere in considerazione rispetto all'accrescimento e allo sviluppo delle piante nelle coperture verdi è costituito dalla luce che condiziona sia la fotosintesi sia l'inserimento delle piante nelle in relazione all'esposizione solare dell'edificio ([7]. Sotto questo aspetto le piante si possono suddividere in:

- specie eliofile, che vivono bene se esposte in pieno sole;
- specie sciafile, che vegetano bene se esposte a mezz'ombra o addirittura in ombra.

Infatti, occorre tenere presente che le foglie delle piante si muovono seguendo l'inclinazione della radiazione solare (Figura4). In particolare, in estate si le piante, soprattutto quelle caduciformi, si orientano verso il sole e in questo modo favoriscono il passaggio d'aria tra le foglie e la parete (effetto parete ventilante e raffreddamento per evapotraspirazione), mentre in inverno (nel caso di sempreverdi) invece poiché il metabolismo della pianta si riduce a causa delle condizioni climatiche, le foglie presentano una minore pressione idrostatica nelle foglie che pertanto si piegano verso il basso con il risultato di formare una copertura continua sulla parete che risulta utile ai fini della protezione dell'edificio dal vento e dalla pioggia. Tra le pratiche colturali sia per le piante decidue che per le sempreverdi sono da tenere in considerazione quelle che si riferiscono alle potature, infatti l'eliminazione di grosse branche spoglie di vegetazione favorisce lo sviluppo di nuove formazioni dotate di intensa attività vegetativa.



**Figura 4 - Orientamento delle foglie alla radiazione solare**

In particolare, nelle specie decidue e soprattutto quando impiegate nelle coperture verdi poste in verticale, alla fine del ciclo vegetativo le foglie dopo avere cambiato colore e disseccate spesso si staccano dai rami e dagli steli della pianta. Pertanto, è opportuno favorire ai fini dei vantaggi microclimatici una regolazione ottimale del ciclo vegetale tra la piena fogliazione e l'inizio della stagione calda in modo da beneficiare di una maggiore ombreggiatura e quindi una maggiore schermatura della radiazione solare e della attività di evapotraspirazione. Ugualmente utile è la contemporaneità tra la caduta delle foglie e il ritorno delle basse temperature in maniera da impedire che la vegetazione svolga funzioni di schermo alla radiazione solare incidente sull'edificio. Soprattutto nei climi freddi, conviene coltivare piante che hanno un breve ciclo vegetativo che consente alla pianta di entrare tardi in vegetazione e di perdere precocemente le foglie. Mentre nei climi caldi è invece preferibile orientarsi verso specie che germoglino precocemente e che, dopo una lunga stagione vegetativa, perdano tardi le foglie. In ultima analisi, oltre alla distinzione tra essenze vegetali a fogliazione precoce e tardiva e specie a defogliazione precoce e tardiva, per favorire la regolazione fogliare nelle diverse stagioni si può agire anche con le potature, l'irrigazione o con la fertirrigazione. Infine, non è secondario considerare che il microclima che si viene a stabilire nei centri urbani densamente popolati e con alta densità di traffico spesso inducono cambiamenti sulla stessa fisiologia delle piante con variazioni degli stessi calendari fenologici. E' opportuno sottolineare che la copertura verde sebbene contribuisca a ridurre i consumi di climatizzazione estiva, rappresenta tuttavia un fattore limitante rispetto all'energia solare incidente sull'edificio nei periodi freddi in quanto anche se ridotta la biomassa agisce comunque da schermo. Il ciclo vegetativo stagionale delle piante impiegate nelle coperture verdi è regolato dai cambiamenti di temperatura e dalle ore di luce che gli organi della pianta riescono a percepire, e perciò, anche se non è possibile definire con assoluta precisione e per ciascuna specie un periodo di deciduità/fogliazione, è comunque possibile affermare che la pianta tenderà a perdere le foglie in autunno per ripresentarle durante la primavera. Le piante sempreverdi non hanno invece un vero e proprio periodo di riposo: esse rallentano le proprie attività vegetative durante l'inverno, pur non perdendo mai le foglie. Ai fini della gestione del manufatto edilizio sarà perciò necessario conoscere il periodo di deciduità delle specie impiegate, in modo che la presenza di foglie non vada a interagire negativamente con le prestazioni dell'edificio. Tenendo conto del fatto che sono comunque reperibili in letteratura tabulazioni indicanti il ciclo vegetativo stagionale per ogni specie vegetale, una regola progettuale sempre valida potrebbe essere quella dell'impiego di piante autoctone: queste, essendosi naturalmente evolute in una data fascia climatica o in un preciso bioma, sono in equilibrio col loro luogo d'origine. Ciò significa che tutte le fasi vitali della pianta sono strettamente legate alle condizioni meteorologiche ed atmosferiche tipiche del clima di provenienza, e quindi anche il periodo di fogliazione sarà correlato a clima e soleggiamento medio di un'area. Le specie autoctone (sia vegetali che animali) sono quelle tipiche e storicamente rilevabili in una data regione geografica e possono perciò anche venire definite specie indigene. Le specie alloctone, invece, provengono da altre aree geografiche e – spesso a seguito dell'opera volontaria o involontaria dell'essere umano – sono state introdotte in un dato luogo solo in un secondo momento, trovandovi delle caratteristiche favorevoli alla propria sopravvivenza. Alcuni tipi di specie alloctone possono creare problemi a quelle autoctone, in quanto possono entrare in competizione

con le piante autoctone e quindi possono limitarne lo sviluppo o addirittura prendendone il sopravvento fino a farle scomparire. Inoltre, un eventuale parassita introdotto casualmente sul territorio nazionale tramite piante alloctone potrebbe trovare favorevole una determinata specie vegetale autoctona e in questo modo avviare una situazione di infestazione sulle specie vegetali autoctone. Le specie alloctone che si contrappongono in modo aggressivo a quelle autoctone sono dette invasive. In particolare, per la realizzazione di coperture vegetali occorre prendere in considerazione i seguenti parametri:

1. Densità della copertura vegetale,
2. Periodo di fogliazione,
3. Dimensione e forma,
4. Velocità di accrescimento e durata,
5. Cure colturali (potatura),
6. Irrigazione e fertilizzazione.

La figura 5 riporta le caratteristiche bio-agronomiche delle essenze vegetali per le coperture verdi.

<b>Temperatura accrescimento</b>	<b>Portamento</b>	<b>Caratteristiche fisiche:</b>
Megaterme (>20°C)	Arbustivo Arboreo Erbaceo	a) Altezza b) Ampiezza
Mesoterme (15-20°C)	Sviluppo rampicante	<b>Metabolismo:</b> a) CAM b) Indifferente
Microterme (0-15°C)	Sviluppo decumbente	<b>Periodo di fogliazione:</b> a) Sempreverde b) Deciduo
Echistoterme (<0°C)	Sviluppo strisciante	<b>Massa fogliare:</b> a) Folta b) Rada
Indifferenti	Sviluppo a cespuglio	
	Self-climbing con radici aeree	
	Self-climbing con ventose	
	Rampicante con foglie speciali per l'ancoraggio	
	Rampicante per intreccio	

**Figura 5 - Caratteristiche bio-agronomiche delle essenze vegetali**

Un fattore non secondario di cui occorre tenere conto quando si progettano le coperture verdi sia in orizzontale che in verticale è rappresentato dalla scelta delle associazioni tra essenze vegetali diverse che se non risultano associate in modo funzionale rispetto alle loro caratteristiche biologiche ed agronomiche possono entrare tra loro in competizione con risultati negativi sul progetto della copertura verde. In particolare, mentre nella realizzazione di un tetto verde non entrano in gioco particolari attenzioni sul tipo di essenza vegetale eccetto che per la scelta dei substrati di coltivazione e dei tempi di irrigazione e concimazione, per le coperture verdi realizzate in verticale in genere si utilizza una sola essenza vegetale

anche se un mix opportunamente realizzato, come vite americana (*Parthenocissus tricuspidata*) e glicine (*Wisteria sinensis*) migliora la parete anche sotto l'aspetto decorativo. In ultima analisi, l'associazione di essenze appartenenti a specie diverse dovrebbe essere attentamente controllata. Infatti, la coltivazione di piante vigorose (crescita rapida) insieme con piante a crescita lenta conduce spesso a risultati negativi anche in considerazione che la diversità delle essenze richiede cure colturali differenti. Per quanto riguarda, invece, la manutenzione dei sistemi vegetali adottati, la Tabella 7 riporta un elenco delle principali azioni.

**Tabella 7 - Schema riassuntivo delle operazioni gestionali richieste dall'installazione di una chiusura vegetata e variabili ad esse associate.**

Elementi del sistema vegetale	A	B	C
	MANUTENZIONE ORDINARIA	MANUTENZIONE STRAORDINARIA	VARIABILI D'INCIDENZA SULLA FREQUENZA DELLE OPERAZIONI
Sistema di supporto	Monitoraggio: <ul style="list-style-type: none"> <li>• stabilità formale</li> <li>• stato delle stratificazioni e delle relazioni interstiziali</li> <li>• connessioni ed interfacce</li> <li>• stabilità chimica e fisica dei materiali</li> </ul>	-	<ul style="list-style-type: none"> <li>• caratteristiche dei materiali del sottosistema</li> <li>• esposizione meteorica (sole, vento, pioggia, neve, umidità, inquinamento atmosferico, etc.)</li> </ul>
		Correzione o recupero delle anomalie riscontrate	Entità specifica (differente da caso a caso) delle patologie
Impianto di fertirrigazione	Monitoraggio: <ul style="list-style-type: none"> <li>• del sistema (nei casi di fertirrigazione si renderà necessaria la ricarica periodica del banco dosatore)</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>• tipologia di sistema</li> <li>• dimensione e conformazione geometrica della parete</li> <li>• dimensione dell'impianto</li> <li>• condizioni particolari</li> </ul>
		Conservazione, correzione o recupero delle anomalie riscontrate	Entità specifica (differente da caso a caso) delle patologie

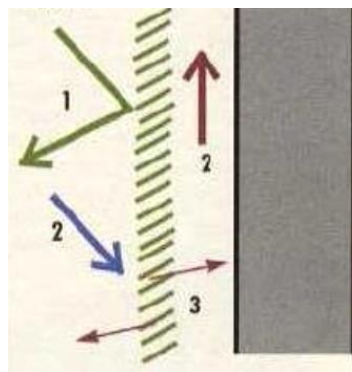
La prima regola che consente di innalzare il bilancio di sostenibilità per una copertura a verde è una corretta selezione delle specie in funzione del contesto ambientale d'inserimento: in tutti i casi consigliabili le specie vegetali autoctone o naturalizzate e, ove possibile, risulteranno sempre consigliabili quelle decidue: questo perché le piante collocate a crescere su strutture edilizie hanno un rendimento ottimale proprio nelle stagioni più calde, mentre l'apporto al contenimento energetico invernale garantito da vegetali sempreverdi – soprattutto alla luce delle più recenti normative sull'efficienza energetica, che richiedono edifici iper-isolati e dall'elevata conservazione energetica invernale – diviene trascurabile. Per i sistemi d'inverdimento parietale più evoluti, non potendo essi in nessun caso impiegare specie a foglia caduca per i motivi precedentemente illustrati, risulterà ancora una volta importante la scelta di piante in equilibrio con gli stimoli ambientali della regione climatica d'inserimento e che, almeno in linea di principio, abbiano una ridotta richiesta di risorse idriche ed energetiche legate alle fasi di gestione e nutrimento. Nel caso di rivestimenti vegetali a schermatura di superfici trasparenti la scelta di una specie decidua è



d'obbligo, mentre con le chiusure opache è possibile optare sia per piante sempreverdi che caducifoglie.

## 4 Radiazione solare e coperture vegetali

La radiazione globale solare ( $R_g$ ) che arriva sulla superficie terrestre è formata dalla somma di radiazione diretta ( $R_d$ ), che ha attraversato l'atmosfera e di radiazione diffusa, tenendo presente che  $R_g < R_a$ , pertanto  $R_a$  è la frazione realmente disponibile. La radiazione solare che giunge su una superficie vegetale subisce da parte del sistema vegetale i seguenti fenomeni: riflessione, trasmissione o assorbimento in relazione alle caratteristiche biologiche e tecniche della superficie vegetale (Figura 6).



- 1) riflessione della radiazione visibile nella banda del verde,
- 2) assorbimento della radiazione nella banda blu-violetto e rosso,
- 3) perdita radiativa nell'infrarosso (calore),
- 4) risalita dell'aria calda per l'effetto camino.

**Figura 6 - Flussi energetici che si stabiliscono tra copertura verde e parete dell'edificio**

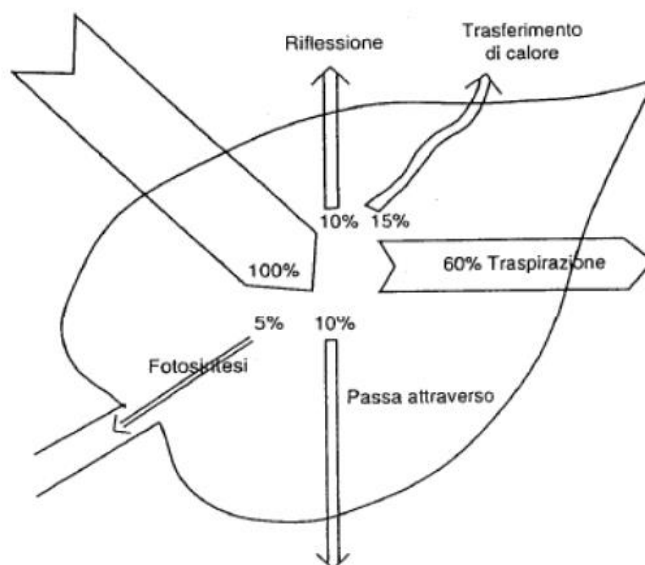
In particolare, l'assorbimento è elevato nella parte visibile delle regioni dello spettro nelle bande del rosso e del blu che risultano le frequenze con maggiore attivazione fotosintetica mentre tende a diminuire nella banda dell'infrarosso vicino, dove è elevata la riflessione in modo da impedire che le radiazioni non fotosintetiche innalzino eccessivamente la temperatura fogliare con ricadute negative sulla pianta e sulla fotosintesi (Tabella 8). Nella regione delle onde lunghe, invece, l'assorbimento è molto elevato ma allo stesso tempo è elevata anche la quantità di radiazione riemessa [8].

**Tabella 8 - Coefficienti di foglie verdi rispetto alla radiazione solare di diversa lunghezza d'onda**

	PAR	NIR	ONDE CORTE	ONDE LUNGHE
Riflessione	0,09	0,51	0,30	0,05
Trasmissione	0,06	0,34	0,20	0,00
Assorbimento	0,85	0,15	0,50	0,95

A livello di singola foglia, le radiazioni elettromagnetiche che giungono sulla superficie fogliare, a causa della struttura fogliare e delle proprietà radianti dei pigmenti che sono contenuti nella foglia, possono essere riflesse, trasmesse o assorbite in relazione alle lunghezze d'onda che costituiscono la radiazione solare che colpisce la foglia (Figura 7). In generale, più densa è la vegetazione più energia viene assorbita

nella massa vegetale che si comporta come un corpo nero. Pertanto la quantità di energia riflessa è mediamente inversamente proporzionale alla dimensione dell'altezza della massa fogliare delle coperture verde. Da un punto di vista energetico, la copertura verde dissipa calore come "calore sensibile" attraverso l'aria e come "calore latente" attraverso i processi di traspirazione dell'acqua del metabolismo vegetale: la componente sensibile aumenta la temperatura dell'aria mentre quella latente la diminuisce. Oltre che per traspirazione, le piante dissipano calore anche per evaporazione del substrato di coltivazione e dalle foglie.

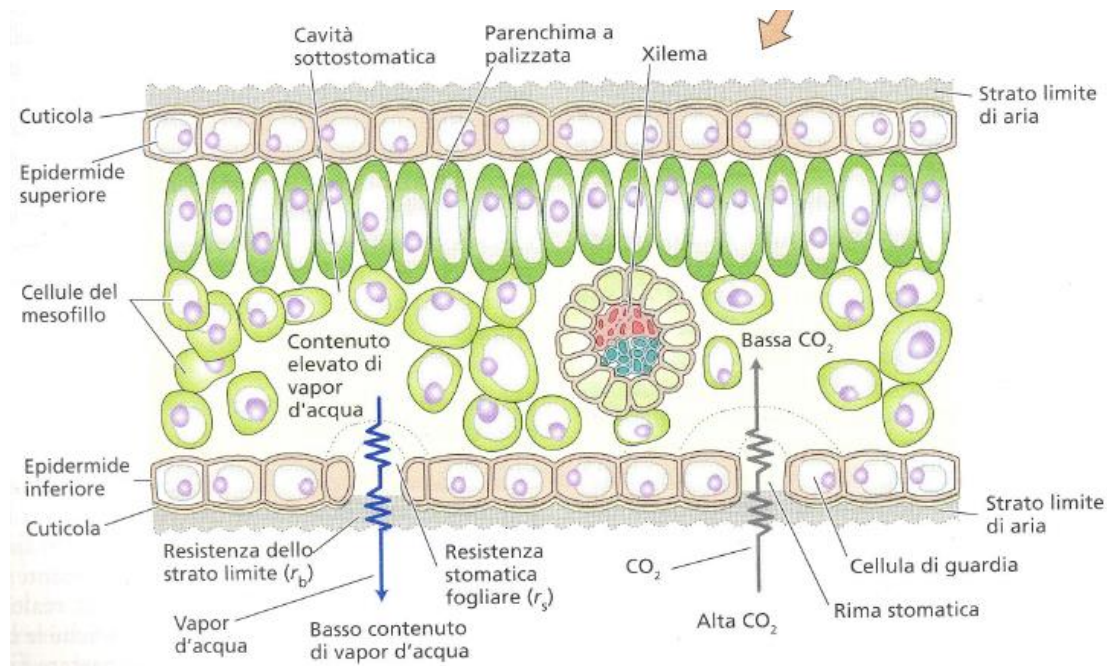


**Figura 7 - Fenomeni biologici e comportamento alle radiazioni solari della foglia**

La mitigazione delle temperature medie massime dell'aria e delle pareti degli edifici è sostanzialmente dovuta all'azione di ombreggiamento da parte della vegetazione (piante erbacee, alberi, cespugli) e per fenomeno dell'evapotraspirazione che, in ultima analisi, rappresenta la quantità di acqua che si disperde nell'atmosfera (sotto forma di vapore d'acqua) mediante i processi di evaporazione nel suolo e rispettivamente di traspirazione delle piante attraverso gli stomi (circa il 2% della superficie fogliare).

Per quanto riguarda l'effetto di schermatura della radiazione solare incidente sull'edificio, la quantità di radiazione intercettata è in relazione al parametro LAI (Indice di area fogliare) che, in sostanza, rappresenta l'efficienza bioclimatica dell'effetto di schermatura espresso generalmente in percentuale di radiazione intercettata (o trasmessa) nelle diverse fasi stagionali è valido soprattutto per le piante latifoglie. Il grado di apertura degli stomi è il principale fattore di controllo della traspirazione, oltre alla regolazione dell'entrata di CO<sub>2</sub> e l'uscita di O<sub>2</sub> (sebbene l'uscita di O<sub>2</sub> avvenga soprattutto per diffusione nei tessuti fogliari). In questo modo la pianta regola il suo contenuto idrico, il trasporto delle sostanze nutritive assorbite con le radici, il gradiente di concentrazione di vapore d'acqua tra le superfici delle cellule fogliari e l'aria. In pratica, il valore della traspirazione, cioè dell'acqua emessa dalla pianta attraverso gli stomi, è proporzionale alla differenza di pressione di vapore tra la foglia e l'aria ambiente e inversamente proporzionale al parametro della resistenza stomatica alla diffusione che costituisce un parametro variabile in relazione al tipo di pianta. Grazie alla perdita di acqua per traspirazione dalle foglie, la pianta abbassa la sua temperatura poiché riesce a smaltire il carico di calore accumulato con l'energia solare attraverso il passaggio di stato da acqua a vapore d'acqua e in questo modo dissipa parte dell'energia solare assorbita sotto forma di calore latente [9]. La circolazione dell'aria intorno alla foglia rimuove per convezione il calore sensibile dalla superficie fogliare se la temperatura della foglia è più alta di quella dell'aria che la circonda mentre attraverso l'evaporazione dell'acqua, che richiede energia, smaltisce calore latente e immette vapore d'acqua nell'aria circostante la copertura fogliare (Figura 8). La vegetazione, pertanto, se razionalmente utilizzata può rappresentare uno strumento valido per il controllo della temperatura dell'aria

delle aree esterne anche attraverso l'impiego di sistemi di irrigazione nei momenti della giornata che risultano particolarmente caldi. Studi in proposito, riportano che a causa della molteplicità dei parametri da cui dipende la evapotraspirazione risulta estremamente difficile sviluppare una modellazione dettagliata dell'effetto di raffreddamento sul clima urbano sebbene l'effetto della evapotraspirazione possa essere percepito su aree urbane di superficie non inferiore ai 2000 m<sup>2</sup>.



**Figura 8 - Scambi fisiologici nella foglia**

Le variazioni di temperatura alterano il gradiente di pressione di vapore tra interno ed esterno della foglia (soprattutto quando il contenuto di acqua nell'aria rimane costante) e si riflettono sulla velocità di traspirazione nonché sull'attività metabolica degli enzimi e sulla fotosintesi (Tabella 9).

**Tabella 9 - Relazione tra UR e pressione di vapore d'acqua**

PRESSIONE DI SATURAZIONE DEL VAPORE D'ACQUA NELL'ARIA (mm Hg)				
Temperatura (°C)	10% UR	50% UR	70% UR	Saturazione (100% UR)
10	0,92	4,60	6,45	9,21
20	1,75	8,77	12,28	17,54
30	3,18	15,91	22,27	31,82
40	5,53	27,66	38,72	55,32

Valori di umidità relativa superiori al 90% condizionano il trasporto dei nutrienti e dell'acqua nelle piante mentre valori sotto il 60%, soprattutto in aree climatiche con forte insolazione e scarsa ventilazione, possono causare stress fisiologici alle piante con risultati negativi sulla crescita. Anche la velocità dell'aria, influenza il gradiente di pressione di vapore d'acqua in prossimità della superficie fogliare. Normalmente sulla superficie della foglia si forma uno strato limite costituito di aria immobile che il vapore d'acqua deve attraversare per diffondere dalla foglia all'atmosfera. Quanto più sottile è questo strato tanto più elevato è il gradiente di pressione del vapore d'acqua e tanto più pronunciata la traspirazione (Tabella 10).

**Tabella 10 - Interazioni tra temperatura e gradiente di pressione di vapore ( $\Delta pV$ )**

	Temperatura (°C)	pV di saturazione (interno alla foglia)	pV in aria al 50% UR (mm Hg)	$\Delta pV$ tra foglia ed aria (mm Hg)
<b>A:</b> pressione di vapore d'acqua in aria ad UR costante, cioè con differente contenuto d'acqua per ciascuno dei livelli di temperatura.	10	9,21	4,60	4,61
	20	17,54	8,77	8,77
	30	31,82	15,91	15,91
<b>B:</b> contenuto di vapore d'acqua costante nell'aria, con valore corrispondente al 50% di UR a 20 °C, cioè il contenuto d'acqua non varia con la temperatura.	10	9,21	8,77	0,44
	20	17,54	8,77	8,77
	30	31,82	8,77	23,05

In generale, il valore della traspirazione, cioè dell'acqua che sotto forma di vapore d'acqua fuoriesce dagli stomi, è proporzionale alle differenze di pressione di vapore tra la foglia e l'aria esterna (ambiente) e inversamente proporzionale alla resistenza stomatica nei confronti della diffusione [10]. La formula, semplificata, del flusso evaporativo E, espresso in grammi al secondo, si può esprimere come:

$$E = \Delta W/R \quad (1)$$

dove :

$\Delta W/R$  : differenza tra le concentrazioni di vapore nella foglia e nell'aria ( $g \cdot m^{-3}$ );

R : resistenza stomatica delle piante ( $s \cdot m^{-1}$ ).

Nella (1) si stabilisce che la velocità di traspirazione, in grammi di acqua per centimetro quadrato di superficie traspirante, è proporzionale alla differenza della concentrazione del vapore d'acqua, o ad E, la differenza della pressione di vapore esistente tra la superficie evaporante all'interno della foglia e la massa d'aria circostante, diviso la somma delle resistenze alla diffusione ( $R_{foglia} - R_{aria}$ ) in cm/sec. L'energia necessaria per l'evaporazione dell'acqua e quindi per il processo di traspirazione è ottenuta durante il giorno dalla radiazione solare. In particolare, la forza traente per la corrente respiratoria è in larga misura l'energia libera di evaporazione, ovvero l'energia di conversione dell'acqua liquida in vapore d'acqua: un processo endotermico ( $\Delta H > 0$ ) spinto dal calore solare, e con entropia forte ( $T \Delta S < 0$ ), per cui il  $\Delta G$  è complessivamente negativo. La traspirazione, contribuisce al raffreddamento della foglia e dell'ambiente confinante, poiché il calore di evaporazione da acqua a vapore d'acqua vale circa 700 kWh per 1 m<sup>3</sup> di H<sub>2</sub>O evaporata. Il tasso di traspirazione della foglia dipende dalla temperatura della foglia, dalla concentrazione di vapore in atmosfera, dalla resistenza delle cavità degli stomi al passaggio del vapore verso l'esterno. Più in dettaglio, il tasso di traspirazione della foglia si può esprimere come:

$$E_i = (p_{vs} - p_{va}) / R_v \quad (gr \ m^{-2} \ s^{-1}) \quad (2)$$

dove:

$p_{vs}$  = densità media di vapore saturo in relazione alla temperatura della foglia,

$p_{va}$  = densità di vapore dell'aria,

R = resistenza di tutte le foglie sulla pianta.

In modo più specifico, nelle piante che crescono in contenitori riempiti con substrato (coltivazione senza

suolo) il tasso di traspirazione per unità di superficie è:

$$E_p = (\rho_{vs} - \rho_{va}) / R_v \quad (3)$$

dove:

$\rho_{vs}$  = densità di vapore saturo delle foglie,

$\rho_{va}$  = densità di vapore saturo dell'aria,

R = resistenza specifica di tutte le foglie sulla piante presenti sulla pianta.

Nel caso che tutte le foglie risultino con lo stesso valore di  $R_v$ , allora il tasso di traspirazione per unità di superficie del suolo è :

$$E_p = LAI \times E_l \quad (4)$$

dove :

LAI = Leaf Area Index per unità di suolo (area del suolo),

$E_l$  = tasso di traspirazione delle foglie.

Un valore tipico per  $E_p$  in zone aride è pari a  $7 \text{ kg}_{\text{H}_2\text{O}} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{g}^{-1}$ , mentre in aree agricole umide si hanno valori variabili nel *range*  $2\text{-}3 \text{ kg}_{\text{H}_2\text{O}} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{g}^{-1}$ . Valori intermedi si raggiungono in aree agricole temperate [11].

#### 4.1 LAI: definizioni e metodi di misura

Il LAI può essere più precisamente definito in vari modi diversi, e questo porta sui risultati sintetizzati in questo documento. Ad esempio, l'area fogliare può essere misurata come la superficie totale di foglie in una chioma. Questo è pari a 2 s nel caso di latifoglie e maggiore di 2 s per foglie aghiformi, foglie succulente e steli fotosintetici. Questo complica il confronto tra le misure di LAI raccolti utilizzando diverse metodologie. Barclay [12] ha indicato che esistono almeno cinque misure comuni di LAI, che riflettono in parte le diverse finalità per le quali LAI è determinato (ad esempio la crescita della vegetazione, attività fisiologica, attenuazione della luce). I quattro più comuni di questi sono definiti come:

- LAI totale: sulla base della superficie esterna totale delle foglie, riferita all' unità di superficie di suolo orizzontale sotto la chioma;
- LAI su un solo lato, come la metà del totale LAI, anche se i due lati delle foglie non sono simmetrici;
- LAI come proiezione orizzontale vale a dire l'area di 'ombra' che sarebbe prodotta da ciascuna foglia con una sorgente luminosa posta a distanza infinita e perpendicolare ad essa;
- 'Silhouette' LAI, che è l'area proiettata dalle foglie sulla base delle inclinazioni della foglia.
- Una ulteriore definizione, secondo Barclay è una variante di questo approccio, considerando le aree di foglie sovrapposte sola volta.

I metodi per la stima del LAI possono essere così elencati:

1. raccolta distruttiva e determinazione diretta della superficie fogliare su un solo lato, utilizzando carta millimetrata, o sistemi di misurazione ottici automatici;
2. raccolta e pesatura del totale della copertura, convertito in superficie fogliare determinando l'area fogliare specifica (area fogliare / massa foglia) di sottocampioni fogliari;
3. allometria, utilizzando relazioni specie-specifiche tipiche di ogni per popolazione, basate sulla misurazione distruttiva dettagliata di un sottocampione di foglie, rami o interi individui;

4. metodi di contatto indiretti, come fili a piombo o quadrats point inclinati;
5. i metodi senza contatto indiretti, come il Decagono Ceptometer (Decagon Devices, Inc. Pullman, Washington, U.S.A.), il LICOR LAI-2000 (Li-Cor, Inc., Lincoln, Nebraska, U.S.A.), o l'analisi di fotografie emisferiche.

Le diverse metodologie impiegate dipendono anche dalla definizione di LAI che viene considerata. Ad es. le metodologie (a) e (b) sono comunemente usate in combinazione con la definizione (2) di LAI, mentre le metodologie (d) e (e) sono usate con le definizioni (3) e (4), rispettivamente. La metodologia (c) può essere utilizzato con qualsiasi delle definizioni LAI, compresa la definizione (1), a seconda dei dettagli della calibrazione delle equazioni allometriche.

#### 4.1.1 Architettura fogliare

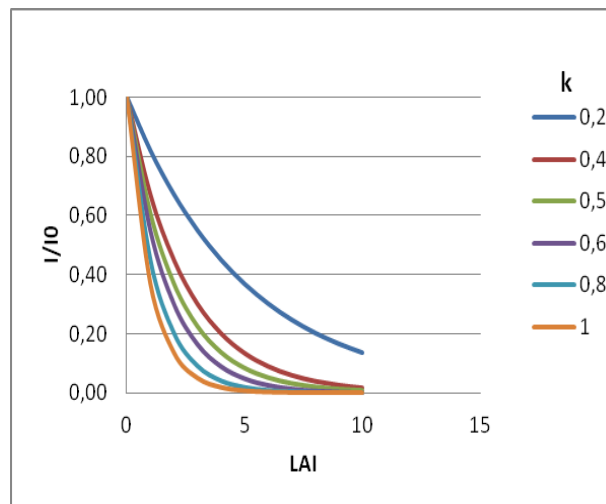
La frazione di radiazione incidente intercettata in funzione del LAI dipende anche dell'altezza del sole sull'orizzonte. Nel caso di foglie con orientamento prevalentemente verticale, quando il sole è molto alto la radiazione penetra più profondamente nella copertura fogliare di quanto non si verifichi con le foglie disposte orizzontalmente, mentre quando il sole è basso è vero il contrario. La diversa capacità di intercettare la radiazione a parità di LAI in specie differenti, dipende dal diverso orientamento delle loro foglie, che possono essere *planofile*, ossia distribuite orizzontalmente, o *erettofile*, ossia pressoché perpendicolari al terreno. In generale, l'inclinazione delle foglie determina la quota di energia incidente assorbita dagli strati superiori della copertura vegetale: foglie prevalentemente orizzontali (inclinazione planofila) aumentano tale quota, mentre foglie prevalentemente erette (inclinazione erettofila) la diminuiscono, a vantaggio degli strati inferiori. Pertanto, la diminuzione dell'intensità della radiazione all'aumentare dello spessore della copertura fogliare può essere rappresentata da un decadimento esponenziale con un coefficiente che dipende dalle diverse specie vegetali considerate. Le caratteristiche dell'architettura fogliare che determinano la quantità di radiazione intercettata possono essere espresse attraverso un coefficiente (*k*) che prende il nome di *coefficiente di estinzione della radiazione*. Esso esprime l'efficienza dell'area fogliare nell'intercettazione della radiazione e dipende pertanto prevalentemente dall'architettura fogliare, ovvero dal modo in cui le foglie sono disposte in una data copertura vegetale, ma anche dal numero di piante per unità di superficie e dalla loro disposizione spaziale. Esso rappresenta la quantità di luce attenuata per unità di indice di area fogliare e fornisce una indicazione del grado di assorbimento e riflessione della luce da parte delle foglie (*k*=1 per foglie planofile) Dipende prevalentemente dall'angolo di inserzione delle foglie. Esso varia con l'elevazione solare e l'azimuth ma è relativamente costante entro un ampio intervallo di angoli solari e per parecchie ore intorno a quelle centrali del giorno. In generale *k* risulta molto sensibile al valore dell'angolo che la foglia forma rispetto ad un piano orizzontale e assume quindi i valori più elevati nel caso di foglie planofile, ed i più bassi nel caso di foglie erettofile. Il valore di *k* eccezionalmente basso riportato in tabella per il gladiolo è dovuto all'inclinazione praticamente verticale delle foglie che consente la penetrazione della radiazione all'interno della copertura. Bassi valori di *k* si registrano anche nel caso di foglie disposte a rosetta e fortemente angolate. In generale, *k* è molto poco sensibile ad altre caratteristiche della copertura fogliare quali l'altezza. Girasole e trifoglio, ad esempio, hanno valori elevati e simili di *k* (0,9) nonostante differiscano notevolmente nell'altezza, a causa della comune disposizione, praticamente orizzontale, delle foglie, che porta alla quasi completa intercettazione della radiazione dagli strati superiori. La relazione tra *k* e la quantità di radiazione intercettata è una esponenziale negativa ed è stata definita da Monsi e Saeki[13] come:

$$I = I_0 e^{-kL}$$

dove *I*<sub>0</sub> rappresenta la quantità di radiazione disponibile al di sopra della copertura vegetale, *I* la radiazione disponibile alla superficie del terreno. La stessa equazione può essere scritta come:

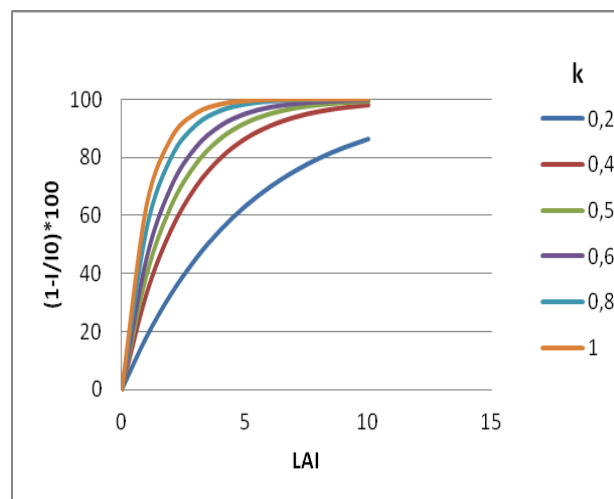
$$\frac{I}{I_0} = e^{-kLAI}$$

Dove  $I/I_0$  altro non è che la frazione di radiazione incidente che raggiunge la superficie del terreno dopo aver attraversato la coltre vegetale (ad esempio 0,40 se  $I_0=100$  e  $I=40$ ), il cui complemento a 1 rappresenta la frazione di radiazione incidente intercettata dalla coltura (0,60) (Figura 9).



**Figura 9 - frazione di radiazione incidente intercettata dalla coltura**

Il grafico sottostante (Figura 10) riporta la soluzione di questa equazione per valori di  $k$  da 1 a 0,2 con  $(1 - I/I_0) * 100$  in ordinate.



**Figura 10 - Valori di K**

Le curve riportate nel grafico, corrispondenti ad altrettanti valori di  $k$ , mostrano come la percentuale di radiazione intercettata dalla coltura sia funzione sia del valore di  $k$  che del  $LAI$ . Le differenze determinate dal diverso valore di  $k$  sulla quantità di radiazione intercettata sono più marcate per i valori di  $LAI$  compresi tra 2 e 4. Si può anche notare che i valori di  $LAI$  necessari per raggiungere uno stesso livello di intercettazione della radiazione, ad esempio il 70%, sono tanto più alti quanto minore è  $k$ , passando da poco più di 1 con  $k = 1$  a circa 2,5 con  $k = 0,5$ , a 6 con  $k = 0,2$ . Le curve riportate nel grafico, corrispondenti

ad altrettanti valori di  $k$ , mostrano come la percentuale di radiazione intercettata dalla coltura sia funzione sia del valore di  $k$  che del LAI. Le differenze determinate dal diverso valore di  $k$  sulla quantità di radiazione intercettata sono più marcate per i valori di LAI compresi tra 2 e 4. Si può anche notare che i valori di LAI necessari per raggiungere uno stesso livello di intercettazione della radiazione, ad esempio il 70%, sono tanto più alti quanto minore è  $k$ , passando da poco più di 1 con  $k = 1$  a circa 2,5 con  $k = 0,5$ , a 6 con  $k = 0,2$ .

## 4.2 Bilancio energetico semplificato

Nella prima fase del programma di ricerca l'attenzione è stata rivolta a definire, attraverso un bilancio energetico semplificato, l'effetto della copertura vegetale sulla temperatura raggiunta dalle superfici di un edificio. A tale scopo è stato predisposto un foglio di calcolo che, sulla base della localizzazione geografica, permette di stimare la temperatura raggiunta da una superficie per effetto dell'esposizione alla radiazione solare in assenza o in presenza della vegetazione. Il modello, volutamente semplificato, rappresenta un punto di partenza per la messa a punto di un Sistema di Supporto alle Decisioni (DSS) che possa fornire indicazioni utili a guidare la scelta delle specie vegetali più idonee in funzione delle diverse condizioni climatiche. L'obiettivo infatti non è una esatta simulazione del comportamento dell'edificio dal punto di vista energetico, bensì fornire in maniera rapida informazioni utili per la progettazione degli interventi.

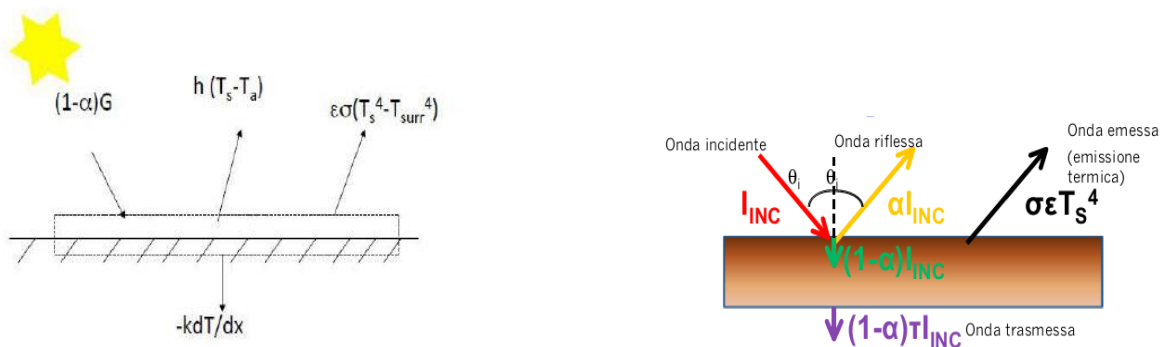
### 4.2.1 Definizioni

Una superficie esposta alla radiazione solare globale  $RG$  riceve l'energia  $(1 - \alpha) * RG$ . Di conseguenza, la sua temperatura  $T_s$  ( $^{\circ}K$ ) si incrementa, trasmettendo calore secondo lo schema riportato nella Figura 11, ovvero attraverso i seguenti fenomeni:

**Convezione.** È il calore scambiato con il movimento dell'aria.

**Irraggiamento.** È il calore scambiato a distanza, attraverso onde elettromagnetiche, che tutti i corpi aventi una temperatura superiore allo zero assoluto emettono (e/o ricevono).

**Conduzione.** È il calore scambiato per contatto tra due corpi a differente temperatura.



$$(1-\alpha) G = \epsilon \sigma (T_s^4 - T_{sky}^4) + h_c (T_s - T_a) + kdt/dx$$

Figura 11 - Bilancio della superficie di un materiale

### 4.2.2 Trasmissione del calore

$$(1-\alpha) R_G = \epsilon \sigma (T_s^4 - T_{sky}^4) + h_c (T_s - T_a) \quad (A)$$



**Convezione :  $Q_c = h \cdot (T_s - T_a)$ ,**

essendo  $T_a$  la temperatura dell'aria,

$h$  un fattore di convezione, calcolabile con la seguente formula empirica:

$h = 1,78 + 1,84 \cdot v^{0,33}$ ; normalmente  $2 \leq h \leq 10$ .

**Irraggiamento:  $\varepsilon \sigma (T_s^4 - T_{sky}^4)$**

perché la superficie "guarda" il cielo. I parametri sono:

$\varepsilon$  = emissività, dipendente dal tipo di superficie,

$\sigma$  = costante di Stefan-Boltzman =  $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$ ,

$T_{sky}$  = temperatura del cielo =  $0,055 T_a^{1,5}$ .

### **Albedo ed emissività**

I valori di albedo e di emissività dipendono dalla superficie e dal suo colore. Essi sono riportati nella tabella.

### **Temperatura della superficie**

Per una superficie esposta al sole considerando pari a 0 lo scambio di calore per conduzione, la temperatura può essere calcolata a partire dalla relazione (A) attraverso un processo iterativo. In alternativa, può essere utilizzata la seguente formula:

$$T_s = 309.07 + \frac{(1066.07\alpha - 31.98\varepsilon)}{(6.78\varepsilon + h_c)} - \frac{(890.94\alpha^2 + 2153.86\alpha\varepsilon)}{(6.78\varepsilon + h_c)^2}$$

La radiazione solare incidente su di una superficie può essere considerata come la somma di tre componenti, e cioè: radiazione diretta, che corrisponde all'energia proveniente direttamente dal sole. radiazione diffusa, che subisce, per l'appunto, un processo di riflessione diffusa da parte delle molecole di gas, delle particelle di vapore acqueo e aerosol e delle polveri contenute nell'atmosfera, e si propaga praticamente in modo uniforme in tutte le direzioni.

La radiazione riflessa, che corrisponde a quella quota delle due precedenti che, dopo essere stata intercettata dagli elementi circostanti la superficie in oggetto, viene riflessa verso di essa. La somma dei i flussi di radiazione diretta e diffusa con lunghezze d'onda comprese fra 0,3 e 60  $\mu\text{m}$  è definita come radiazione solare globale :  $RG = RD + Rd \cdot Rr$ . La radiazione che investe una superficie in parte viene riflessa e si definisce albedo di una superficie il rapporto tra la radiazione riflessa (nel campo del visibile e vicino infrarosso: 0,3÷3  $\mu\text{m}$ ) e la radiazione globale. Parte della radiazione incidente viene invece assorbita e riemessa sotto forma di radiazione termica. La radiazione netta ( $R_n$ ) rappresenta la differenza tra la radiazione globale e quella riemessa dalla superficie considerata nello spettro compreso fra 0,3 e 60  $\mu\text{m}$ . Il calore irradiato dal sole è in parte riflesso ed in parte assorbito: la copertura cede calore all'ambiente esterno per convezione (ovvero per i moti dell'aria) e per irraggiamento termico nell'infrarosso. L'apporto energetico solare assorbito e non riemesso verso l'atmosfera esterna per convezione e, soprattutto, per irraggiamento nell'infrarosso va a riscaldare la copertura ed il locale sottostante. Per ridurre il riscaldamento estivo dell'edificio è necessario che la sua superficie esterna possieda un'elevata capacità sia di riflettere l'irradiazione solare, sia di cedere energia all'atmosfera esterna per irraggiamento termico

nell'infrarosso. Ciò porta ad individuare alcune proprietà della superficie su cui intervenire (Tabella 11):

- RIFLETTANZA SOLARE (Albedo), cioè la frazione ri-emessa dell'irradiazione solare ( $<2.5\mu\text{m}$ ) rispetto alla quantità incidente. Maggiore è l'albedo, minore la quantità di energia immagazzinata dal corpo quindi minore la sua temperatura superficiale.
- EMISSIVITÀ TERMICA, ovvero il rapporto tra l'emissione di calore della superficie per irraggiamento termico nell'infrarosso ( $>2.5\mu\text{m}$ ) e la massima emissione teorica (corpo nero). Maggiore è l'emissività, maggiore la quantità di energia che il corpo è in grado di rilasciare sotto forma di calore. In ultima analisi, è la capacità di un materiale di riparare dalla radiazione infrarossa, ossia di rimettere all'esterno il calore assorbito, evitandone la trasmissione all'edificio. È un parametro compreso fra 0 e 1 (0 - 100%). Pertanto, valori di emissività elevati riducono la quantità di calore trasmesso all'edificio.
- INDICE DI RIFLESSIONE SOLARE SRI (Solar Reflectance Index), ovvero il parametro che esprime la capacità di un materiale di respingere il calore solare. Parametro che coniuga i valori di Rifettanza e Emittanza, ed esprime la capacità di un materiale di respingere il calore solare). È definito in modo tale che per il nero standard è 0, e per il bianco standard è 100. I materiali con più elevato valore di SRI consentono di ridurre le temperature superficiali delle coperture.

**Tabella 11 - Valori di albedo ed emissività delle superfici**

Tipo di superficie	Albedo	Emissività
Urbano misto	0,15	0,90
Asfalto	0,10	0,90
Cemento	0,20	0,80
Vernice bianca	0,70	0,70
Tegole	0,20	0,85
Bosco sempreverde	0,15	0,97
Bosco deciduo	0,20	0,95
Cespugli sempreverdi	0,12	0,97
Cespugli decidui	0,20	0,97
Prato inglese	0,25	0,96
Incolto	0,16	0,96
Agricolo	0,20	0,95
Irriguo	0,18	0,95
Terreno nudo	0,16	0,86
Lago	0,14	0,99
Zona umida	0,12	0,98

### **Calcolo della radiazione**

Esistono diversi modi per il calcolo dell'energia solare incidente su superfici comunque orientate ed inclinate, basati su algoritmi più o meno complessi. In condizioni di cielo sereno è possibile una stima del flusso di radiazione che in ogni istante del giorno raggiunge una superficie orizzontale

$$R_D = R_e \tilde{\Gamma}_D \cos \Theta_z,$$

$$R_d = R_e \tilde{\Gamma}_d \cos \Theta_z,$$

$$R_G = R_D + R_d = R_e \tilde{\Gamma}_D \cos \Theta_z + R_e \tilde{\Gamma}_d \cos \Theta_z,$$

Con

- $R_G$  = radiazione globale sul piano orizzontale ( $W m^{-2}$ ),  
 $R_D$  = radiazione diretta sul piano orizzontale ( $W m^{-2}$ ),  
 $R_d$  = radiazione diffusa sul piano orizzontale ( $W m^{-2}$ ),  
 $\Theta_z$  = angolo zenitale dei raggi solari,  
 $R_e$  = radiazione extra-atmosferica nel giorno giuliano considerato (n) che giunge su un piano perpendicolare alla direzione dei raggi ( $W m^{-2}$ ).

**Angolo zenitale**, rappresenta un particolare angolo di incidenza della radiazione solare, riferito ad una superficie orizzontale.

$\Theta_z$ , angolo compreso tra la congiungente sole – terra nel sito in oggetto e la retta verticale, tracciata rispetto al punto considerato. il suo valore è fornito dalla formula:

$$\Theta_z = \arccos(\cos\phi \cos\delta \cos\omega + \sin\phi \sin\delta)$$

(In alternativa all'angolo zenitale, si può fare riferimento all'altezza o elevazione solare  $\beta$  rappresentata dall'angolo formato dalla congiungente sole – terra nel sito in oggetto (questa retta può essere immaginata come un singolo raggio di luce che colpisce il punto in cui si trova l'osservatore) con il piano orizzontale. Il suo valore si può calcolare utilizzando la formula:

$$\beta = \arcsin(\cos\phi \cos\delta \cos\omega + \sin\phi \sin\delta).$$

**Declinazione solare**, si definisce  $\delta$ , angolo di declinazione solare, l'angolo formato dalla congiungente centro della terra – centro del sole con il piano equatoriale. Il suo valore varia continuamente, ma, con buona approssimazione, si può considerare costante nell'arco del singolo giorno. Nel corso dell'anno oscilla tra  $+23,45^\circ$  e  $-23,45^\circ$ , in corrispondenza, rispettivamente, del solstizio d'estate (21 o 22 giugno) e del solstizio d'inverno (21 o 22 dicembre). Agli equinozi (20 o 21 marzo e 22 o 23 settembre), quando la durata del giorno uguaglia quella della notte,  $\delta$  vale 0.

$$\delta = 23,45 \sin[360/365 (N + 284)],$$

in cui N rappresenta il giorno giuliano.

**Angolo orario**  $\omega$ , rappresenta l'angolo formato dal piano meridiano (che contiene, cioè, l'asse terrestre) passante per il sole con il piano meridiano passante per l'osservatore posto nel sito relativamente al quale si eseguono i calcoli, nell'ora e nel giorno considerati. Vale 0 a mezzogiorno e varia di  $15^\circ$  ogni ora, assumendo valori positivi al mattino e negativi al pomeriggio (ad esempio, alle ore 10 si ha  $\omega = 30$ , alle ore 13 si ha  $\omega = 15$ ). Un particolare valore dell'angolo orario è rappresentato da  $\omega_s$ , angolo orario al sorgere del sole, simmetrico di quello al tramonto, che si calcola tramite la relazione:

$$\omega_s = \arccos(-\tan\phi \tan\delta)$$

Una volta definito  $\omega_s$ , il suo valore può essere utilizzato per calcolare D, la lunghezza espressa in ore del giorno in questione, e cioè l'intervallo temporale che separa l'alba dal tramonto:

$$D = 2\omega_s / 15.$$

Infine l'ora  $O_s$  in cui sorge il sole, simmetrica di quella in cui tramonta, può essere calcolata mediante l'espressione:

$$O_s = 12 * D/2$$

È possibile calcolare l'altezza solare a mezzogiorno al solstizio d'estate  $\beta_{max}$  (e cioè la massima e la minima che si verifica durante l'anno a quell'ora) tramite le espressioni:

$$\beta_{max} = (90 - \phi) + 23,45^\circ$$

$$\beta_{min} = (90 - \phi) - 23,45^\circ$$

**Azimut solare** L'angolo di azimut solare  $\alpha$  (o più semplicemente azimut) rappresenta l'altro parametro fondamentale nella definizione dei percorsi solari ed indica l'angolo formato dalla proiezione sul piano dell'orizzonte della congiungente sole – terra rispetto al sito in oggetto con il semiasse sud. Secondo la convenzione cui ci si riferisce in questa trattazione, vale zero quando le due rette coincidono ed assume valori positivi verso est e negativi verso ovest. Il suo valore è definito dalla formula:

$$\alpha = \arcsin(\sin\beta \sin\phi - \sin\delta) / (\cos\beta \cos\phi)$$

Si noti che l'attribuzione del segno + o - davanti al valore di  $\alpha$  deve essere svolta, in relazione a quanto detto, rispetto all'ora del giorno in cui l'angolo viene calcolato.

**Angolo d'incidenza**, L'angolo d'incidenza della radiazione solare su di una superficie è quello formato dalla direzione di propagazione dei raggi solari con la retta normale alla superficie stessa. Per quanto riguarda la componente diretta, il suo valore è dato dalla seguente formula:

$$\alpha = \arcsin[\cos\beta \cos(\alpha - \gamma) \sin\phi + \sin\beta \cos\phi]$$

Per effetto della presenza della vegetazione nel bilancio energetico su esposto va aggiunta una componente relativa alla perdita di calore latente dovuta all'evapotraspirazione. In prima analisi non si è introdotta questa componente usualmente di difficile stima. Essa è infatti fortemente influenzata oltre che dalla specie vegetale considerata anche dalla natura e dalle condizioni del suolo. Ma un ulteriore importante effetto della vegetazione è rappresentato dall'ombreggiamento che essa offre alla superficie intercettando la radiazione e producendo una attenuazione della radiazione stessa che raggiunge la superficie. La radiazione solare diretta e diffusa che raggiunge una foglia posta nella parte alta della copertura vegetale può essere assorbita dai pigmenti fogliari, trasmessa o riflessa. Ne deriva che solo parte della radiazione incidente penetra negli strati inferiori della copertura vegetale, ossia nelle foglie poste più in basso. Più profondamente la radiazione penetra all'interno della coltura, più la sua energia viene attenuata. L'attenuazione dell'energia radiante è funzione del numero di strati di foglie attraverso i quali la radiazione penetra, che è a sua volta funzione della superficie fogliare e dell'angolo di inserzione delle foglie. Tanto più densa è la copertura vegetale fogliare e tanto più numerosi sono gli strati che costituiscono la chioma, minore è la quota di radiazione che raggiunge il terreno. La radiazione solare diretta e diffusa che raggiunge una foglia posta nella parte alta della copertura vegetale può essere assorbita dai pigmenti fogliari, trasmessa o riflessa. Ne deriva che solo parte della radiazione incidente penetra negli strati inferiori della copertura vegetale, ossia nelle foglie poste più in basso. Più profondamente la radiazione penetra all'interno della coltura, più la sua energia viene attenuata. L'attenuazione dell'energia radiante è funzione del numero di strati di foglie attraverso i quali la radiazione penetra, che è a sua volta funzione della superficie fogliare e dell'angolo di inserzione delle foglie. Tanto più densa è la copertura vegetale fogliare e tanto più numerosi sono gli strati che costituiscono la chioma, minore è la quota di radiazione che raggiunge il terreno. La consistenza del fogliame della copertura vegetale negli studi di vegetazione e degli ecosistemi è comunemente misurata attraverso l'indice di area fogliare (LAI). Il LAI è generalmente definito come la quantità di superficie fogliare ( $m^2$ ) in una chioma per unità di superficie a terra ( $m^2$ ). Poiché si tratta di una quantità adimensionale, il LAI può essere misurato, analizzato e modellato a diverse scale spaziali, dalle singole chiome di singoli alberi a cluster di intere regioni o continenti. Il LAI è considerato un descrittore centrale e semplice delle condizioni della

vegetazione in un'ampia varietà di studi fisiologici, climatologici e biogeochimici. La copertura vegetale, infatti, è luogo di processi fisici e biogeochimici in un ecosistema. Gli attributi funzionali e strutturali della copertura sono influenzati dalle condizioni microclimatiche, dalla dinamica dei nutrienti e da numerosi altri fattori. La quantità di fogliame che si sviluppa in una pianta è una caratteristica ecologica di base conseguenza dell'effetto complessivo di questi fattori. A sua volta, la superficie fogliare della chioma condiziona la produzione primaria (fotosintesi), la traspirazione, gli scambi di energia, ed altre attività fisiologiche e processi ecosistemici. Schulze [14] ha analizzato l'area fogliare e la capacità di intercettazione della luce della chioma in una recensione di 62 valori di LAI stimati per 12 biomi. Asner [15] ha studiato la variazione di riflettanza della chioma con una raccolta di 29 valori di LAI stimati per 20 tipi di vegetazione.

## 5 Flussi energetici sui tetti verdi

I Green Roofs (Tetti Verdi) sono superfici inverdite che riducono l'effetto isola di calore, poiché sostituiscono le superfici che assorbono il calore con piante, arbusti e piccoli alberi che rinfrescano l'aria attraverso l'evapotraspirazione. Le coperture a verde forniscono benefici sotto molteplici aspetti: l'isolamento termico, la regimazione idrica, il trattenimento e filtraggio delle polveri, l'influenza sulla trasmissione e riflessione del suono, l'essere uno strumento di mitigazione e compensazione ambientale, l'aspetto estetico e la minore manutenzione rispetto alle coperture tradizionali. L'importanza dell'elemento vegetale in termini di tipologia di sistema e di specie vegetali se consideriamo che le funzioni di mitigazione del microclima che interessa gli edifici e le aree urbane in una dimensione più generale sono in relazione alle forme di copertura vegetale (tetto verde, facciate verde, parete verde, prato, pergole, ecc.) e alle caratteristiche bio-agronomiche delle specie coltivate (piante caducifoglie, sempreverdi, ciclo biologico, tipo di coltivazione, concimazioni, irrigazione, fertirrigazione, ecc. In generale, data l'elevata capacità di riflettere la radiazione solare incidente e la sua scarsa emissività, l'azione della copertura verde riduce il surriscaldamento delle superfici costruite grazie a una minore emissione del calore e una conseguente riduzione dell'incremento di temperatura dell'aria (Tabella 12) [16].

**Tabella 12 - Valori di albedo ed emissività**

VALORI TIPICI DI ALBEDO ED EMISSIVITA' ALL'INFRAROSSO			
	Albedo		
Copertura vegetale	Estiva	Invernale	Emissività infrarosso
Campo agricolo	0,17	0,23	0,92
Prato	0,19	0,23	0,92
Foreste decidue	0,16	0,17	0,93
Foreste conifere	0,12	0,12	0,95
Aree umide	0,14	0,14	0,95

Ai fini dell'impiego delle coperture vegetali per gli edifici, è necessario lo studio delle relazioni tra ambiente e spazi edificati soprattutto rispetto ai flussi di calore tra ambienti differenti. In accordo con i principi generali della trasmissione del calore - conduzione, convezione, irraggiamento - gli effetti dell'utilizzo di coperture verdi sotto il profilo energetico, in ultima analisi, si configurano nell'azione schermante rispetto alla radiazione solare incidente sulla costruzione che ospita la copertura a verde e nella riduzione delle temperature dell'aria limitrofa. Ovviamente, per i tre fenomeni di trasmissione del calore, l'entità del flusso, misurato in J/s (W) o come flusso specifico, definibile come densità di flusso e riferito all'unità di superficie in W/m<sup>2</sup>, la trasmissione e l'entità del flusso di calore tra due sistemi dipende dalla differenza di temperatura. Le coperture verdi, nelle diverse accezioni e tipologie di impianto, agiscono sul riscaldamento delle superfici e degli edifici, sia mediante l'umidità dell'aria sia attraverso il meccanismo della

evapotraspirazione delle piante coltivate. I principi che regolano entrambi i fenomeni risultano particolarmente importanti nei periodi di caldo intenso ossia specialmente nei periodi primaverile ed estivo [17]. Tale differenza per le coperture vegetali è regolata dalla seguente legge:

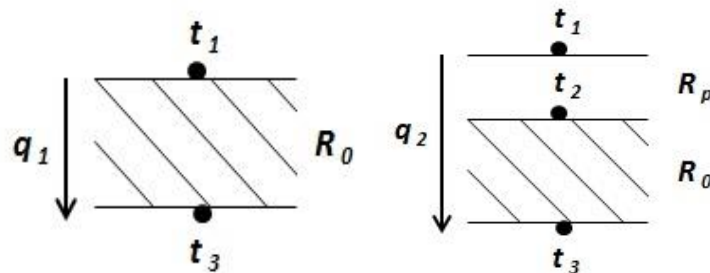
$$q_1 = (1/R_0) * \Delta T$$

dove :

$q_1$  = il flusso di calore trasmesso per conduzione attraverso uno strato,  $W/m^2$

$R_0$  = la resistenza termica dello strato,  $m^2 K/W$

$\Delta T = T_1 - T_2$ , la differenza di temperatura alle due facce dello strato, K



(A) tetto verde munito di strato di suolo (B) tetto verde munito di strato di suolo e di copertura vegetale

In particolare, nella situazione di un tetto verde ossia ricoperto con la vegetazione, si aumenta la resistenza termica e quindi si riduce il flusso di calore che giunge all'interno dell'edificio, quindi l'equazione per il

$$q_2 = \frac{1}{R_0 + R_p} (T_1 - T_3)$$

calcolo del calore trasmesso diventa:

dove :

$R_p$  = la resistenza termica dovuta alla presenza della vegetazione,  $m^2 K/W$

$T_1$  = la temperatura sullo strato di vegetazione, K

Inoltre la vegetazione scherma la radiazione solare incidente e quindi riduce anche la temperatura superficiale del substrato sul quale è collocata la copertura vegetale (grazie a un albedo superiore a 0,25, tipica delle coperture vegetali, maggiore rispetto alle superfici in cemento di 0,22 o di 0,13 nel caso di tetti in bitume e pietrisco). Questi meccanismi possono essere illustrati riferendoci al bilancio di energia monodimensionale alla superficie terrestre, in questo modo:

$$R_n = H + \lambda E + G$$

dove :

$R_n = R_g (1-\alpha) - RL_1 + RL_2$ , rappresenta la radiazione netta, ovvero la differenza tra la radiazione globale (diretta e diffusa) e la frazione riflessa dovuta all'albedo e quella riemessa nell'infrarosso più la radiazione a onda lunga uscente intercettata dai costituenti atmosferici a effetto serra e re-irraggiata verso il suolo (radiazione del cielo), e rappresenta il flusso di energia incidente alla superficie in  $W/m^2$  :

$H$  = il flusso di calore sensibile ceduto all'aria,  $W/m^2$ ,

$\lambda E$  = il flusso di calore latente nell'atmosfera, risultante dell'evaporazione dal suolo e della traspirazione dalla vegetazione,  $W/m^2$ ,

$\lambda$  = il calore latente di vaporizzazione, J/kg,

$E$  = il flusso di vapore conseguente alla conversione dell'energia radiante direttamente ricevuta dalla massa d'acqua, mm/g,

$G$  = il flusso di calore ceduto al suolo,  $W/m^2$ .

Quando  $R_n > 0$ , il flusso di radiazione che raggiunge la superficie è maggiore rispetto a quello che lascia la superficie, avrà un ingresso netto di energia radiante che sarà ripartita dai tre termini al lato destro dell'equazione. Tali flussi hanno valori diversi tra il giorno e la notte, variano inoltre a seconda della stagione, delle condizioni meteorologiche, del contenuto d'acqua nel suolo e del tipo di suolo. Durante il giorno l'energia solare produce una radiazione netta entrante ( $R_n > 0$ ); il surplus energetico risultante viene dissipato per conduzione con il suolo (substrato), per convezione sensibile e latente attraverso l'evapotraspirazione. Durante la notte la direzione dei flussi energetici si inverte ( $R_n < 0$ , poiché viene a mancare l'energia solare): le radiazioni infrarosse emesse (il suolo ha il suo picco di emissione nella banda dell'infrarosso) sono controbilanciate da un apporto di calore sensibile dal suolo, dall'aria e di calore latente con la formazione di rugiada. In ultima analisi, il vantaggio del tetto verde è quello di aumentare il flusso di calore latente  $\lambda E$  relativo al flusso di calore sensibile  $H$  per una data radiazione netta  $R_n$  e di favorire la riduzione del flusso di calore accumulato dagli edifici  $G$ , isolandolo termicamente. Quest'ultimo termine incide soprattutto di notte, quando viene rilasciato il calore accumulato dall'edificio durante il giorno.

## 6 Proposta di un modello

Nel primo anno del programma di ricerca l'attenzione è stata rivolta alla messa a punto di un modello semplificato di calcolo (attraverso l'adattamento di modelli complessi), che consenta di stimare le temperature superficiali esterne in presenza di schermi vegetali nelle diverse condizioni di sviluppo del fogliame. Il modello consente al momento la formulazione di un bilancio energetico, partendo dalle condizioni climatiche e geografiche del sito, tenendo in considerazione l'attenuazione della radiazione per effetto della presenza della vegetazione tenendo conto dello sviluppo del fogliame attraverso il Leaf Area Index ed il coefficiente di estinzione della radiazione  $k$ . Si è inoltre cercato di descrivere il comportamento delle superfici schermate attraverso un indice sintetico; a tale scopo, in questa prima fase dello studio, si è fatto ricorso allo standard per il calcolo del Solar Reflectance Index (SRI) [18] adattandolo alle condizioni in analisi. Nell'impostazione del bilancio è stata posta uguale a 0 la componente relativa alla conduzione vale a dire il trasferimento di calore all'interno della superficie. Questa componente pur essendo molto importante per quando riguarda le condizioni termiche che si possono raggiungere all'interno dell'edificio, è dipendente dai caratteri costruttivi della superficie (materiali utilizzati, spessore dei materiali, ecc.) e non dalle condizioni esterne. In questa prima versione sono state considerate superfici orizzontali, nel prosieguo delle attività sarà introdotta la possibilità di simulare superfici inclinate o verticali e di valutarne il diverso orientamento. Il modello, volutamente semplificato, rappresenta un punto di partenza per la messa a punto di un Sistema di Supporto alle Decisioni (DSS) che possa fornire indicazioni utili a guidare la scelta delle specie vegetali più idonee in funzione delle diverse condizioni climatiche. L'obiettivo infatti non è una esatta simulazione del comportamento dell'edificio dal punto di vista energetico, bensì fornire in maniera rapida informazioni utili per la progettazione degli interventi. Il modello richiede alcuni dati di input relativi alla posizione geografica del sito e l'altimetria inserendo latitudine e altitudine della località prescelta; vanno inoltre inseriti data e ora della simulazione, temperatura dell'aria nel giorno considerato, ed infine i valori di LAI e  $K$  (coefficiente di estinzione di copertura dipendente dall'angolo di inserzione e dal portamento delle foglie) Inoltre vanno inseriti i valori di albedo ed emissività della superficie considerata. Gli elementi utilizzati per il calcolo sono illustrati nel box successivo. Nei grafici seguenti (Figure 12 e 13) sono illustrati l'andamento della temperatura e della radiazione incidente in funzione del Leaf Area Index per diversi valori di  $k$ . I grafici sotto riportati si riferiscono alle seguenti condizioni:

Località: Viterbo,

Data 7 agosto ore 12,

Temperatura dell'aria 29° C,

Albedo della superficie 0,2 (valore tipico di una superficie in cemento ma anche di una superficie vegetata),

Emissività della superficie nuda pari a 0,8. Le linee continue si riferiscono ad un valore di emissività costante pari a 0,8 mentre le curve a tratteggio considerano un valore di emissività per la superficie verde di 0,9.

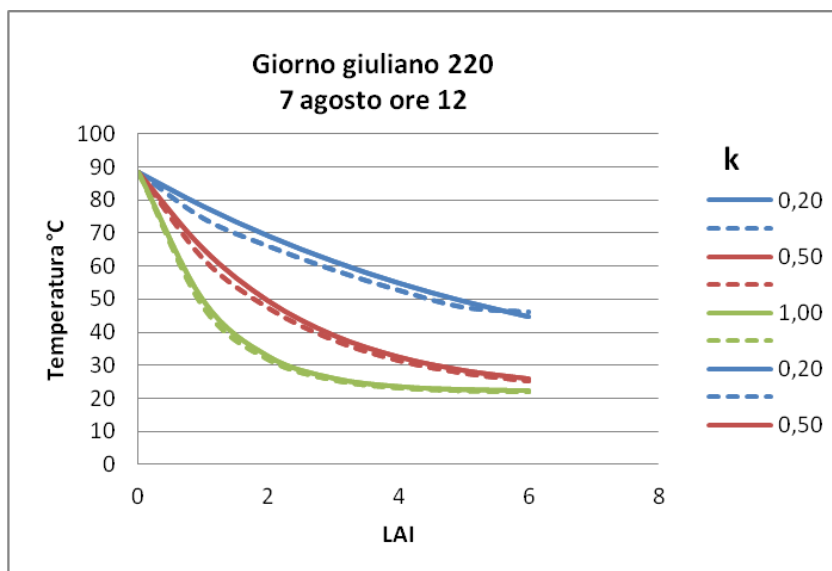


Figura 12 - Temperatura e Leaf Area Index per diversi valori di k

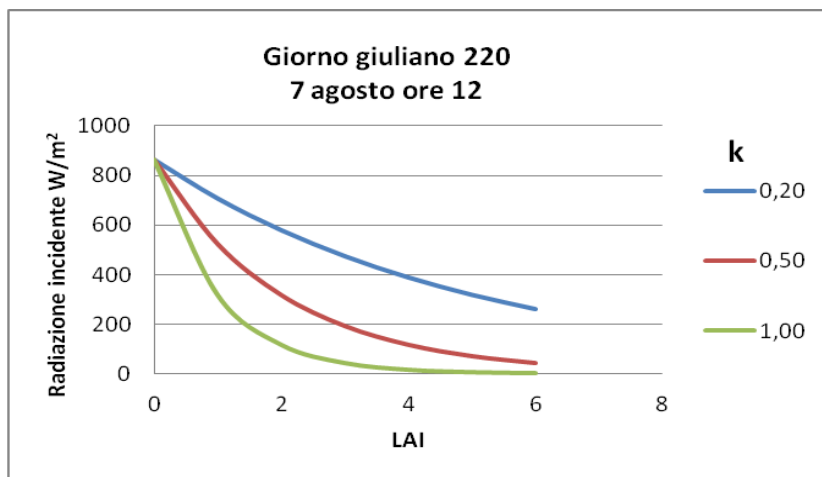


Figura 13 - Radiazione solare e Leaf Area Index per diversi valori di k

Nelle condizioni esposte la superficie non ombreggiata dalla vegetazione, raggiunge una temperatura di circa 90°; simulando l'ombreggiamento progressivo attraverso la variazione dei valori di LAI, si può notare una diminuzione della temperatura anche per valori di LAI pari a 1 e che diventa molto più rapida e consistente all'aumentare di k, passando da circa 80°C nel caso di k = 0,2 a circa 50° nel caso di k=1. I valori sin qui ottenuti necessitano di approfondimenti dal punto di vista sperimentale che consentano di confermare la accettabilità delle semplificazioni introdotte; tuttavia essi mettono in evidenza il ruolo fondamentale dei fattori relativi alla vegetazione, vale a dire che le caratteristiche di inserzione delle foglie sul fusto ed il portamento della pianta sono elementi estremamente importanti ai fini del raffreddamento delle superfici. Un andamento del tutto simile è ovviamente evidenziabile anche per quanto riguarda la



radiazione incidente. Questi primi risultati delle simulazioni rappresentano un punto di partenza per approfondimenti soprattutto volti alla individuazione delle specie vegetali più idonee scelte in base a :

1. assorbimento della radiazione incidente,
2. rapidità di accrescimento,
3. grado di copertura della superficie,
4. longevità,
5. competizione con altre specie.

## 7 Esigenze idriche delle coperture verdi

Una ulteriore possibilità che lega condizionamento atmosferico e proprietà vegetali delle chiusure inverdite è quella inerente al raffrescamento passivo: il passaggio di stato dell'acqua da liquido a gassoso, mediante la traspirazione dei tessuti vegetali consente per ogni litro d'acqua evaporata circa 0,64 kWh di raffreddamento della temperatura dell'aria: tale principio legato all'evaporazione dell'acqua è quello che permette alle piante di dissipare energia mantenendo la propria temperatura sempre prossima o inferiore a quella dell'atmosfera, con vantaggi sotto l'aspetto dell'umidità relativa dell'aria adiacente le pareti dell'edificio rivestite da una copertura vegetale. La conseguenza è che sarà proprio il carico idrico che necessita ai vari apparati a verde a tramutarsi nella discriminante che incide direttamente sulla maggiore o minore umidificazione di un ambiente. Tenuto conto che nei picchi di temperatura, che ormai si registrano sempre più spesso anche nei climi temperati della penisola italiana (Figura 14), le piante raggiungono valori di evapotraspirazione compresi nel *range* 2-5 mm/m<sup>2</sup>/giorno, è evidente la necessità di installare sistemi di irrigazione (o fertirrigazione) in grado sia di evitare gli sprechi sia di utilizzare acqua piovana.

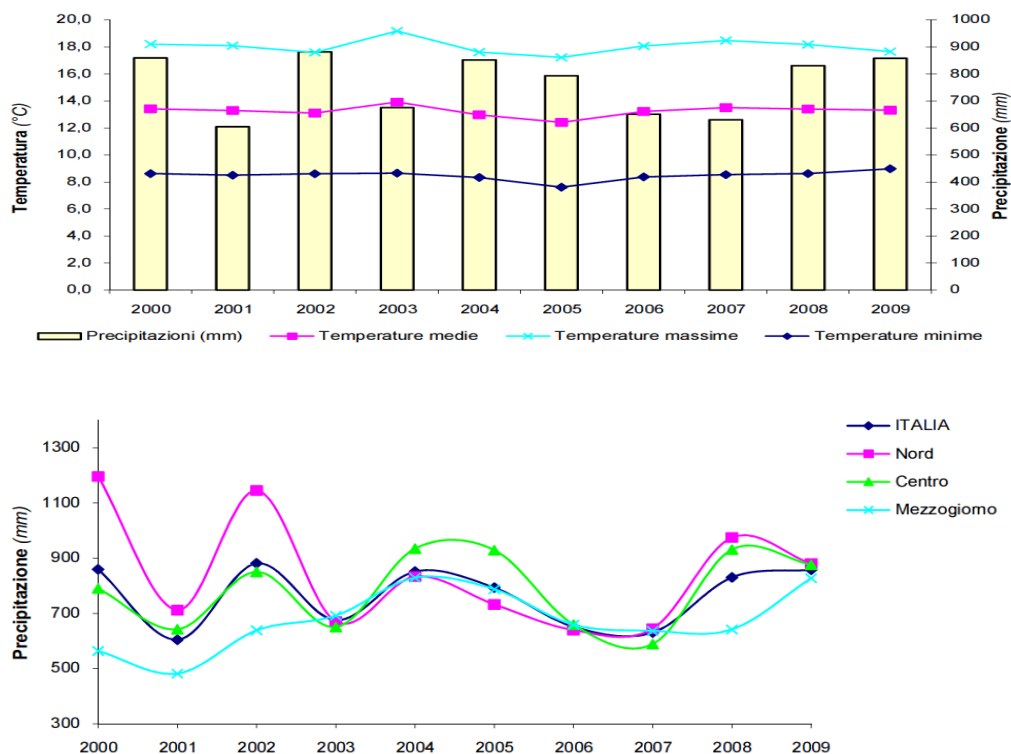


Figura 14 - Dati ISTAT sulle precipitazioni in Italia 2000-2009

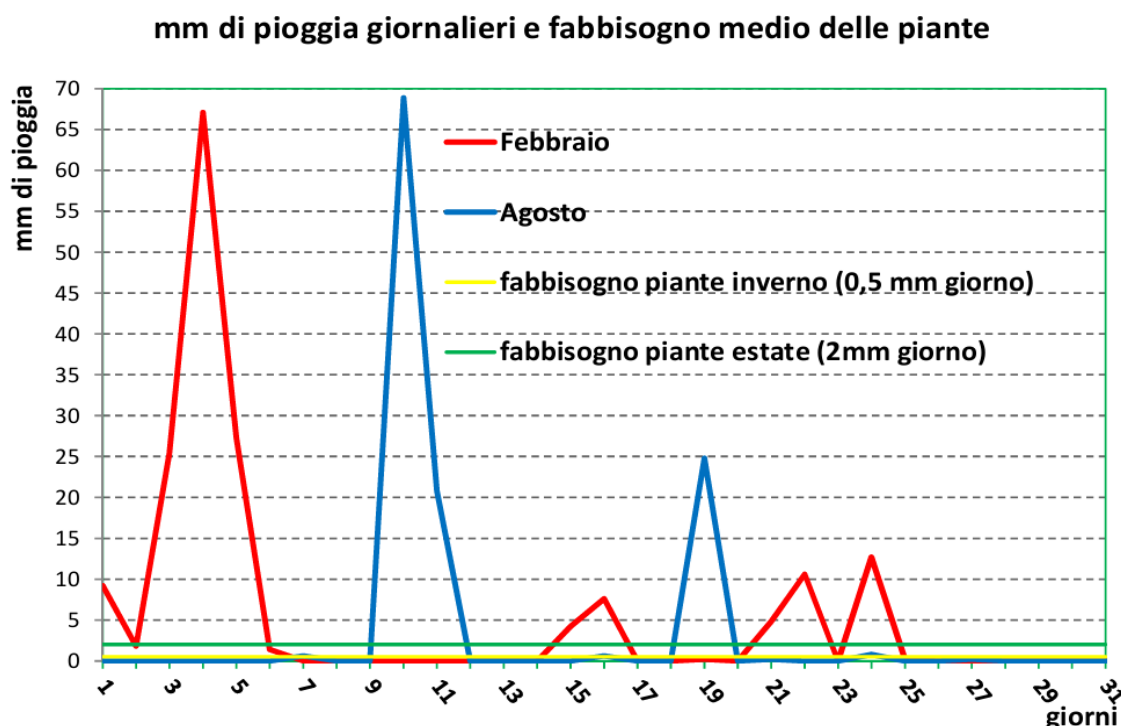
L'impiego dell'acqua come elemento energetico di base comporta il consumo di ingenti quantitativi di acqua e pertanto una attenta analisi nei confronti sia delle specie vegetali da impiegare e sia della

disponibilità di acqua piovana in relazione alle richieste delle essenze utilizzate nella copertura verde (Tabella 13). La sostenibilità delle coperture verdi, pertanto, deve essere garantita attraverso metodi di irrigazione in linea con sistemi di raccolta e recupero dell'acqua piovana e specie vegetali con esigenze in linea con l'andamento delle precipitazioni che caratterizzano l'area di dell'intervento ([19]). I serbatoi d'accumulo permettono di sfruttare in modo migliore l'apporto gratuito di acqua piovana e dunque apportano un contributo positivo a metà tra il volano idrico e l'efficienza dell'irrigazione.

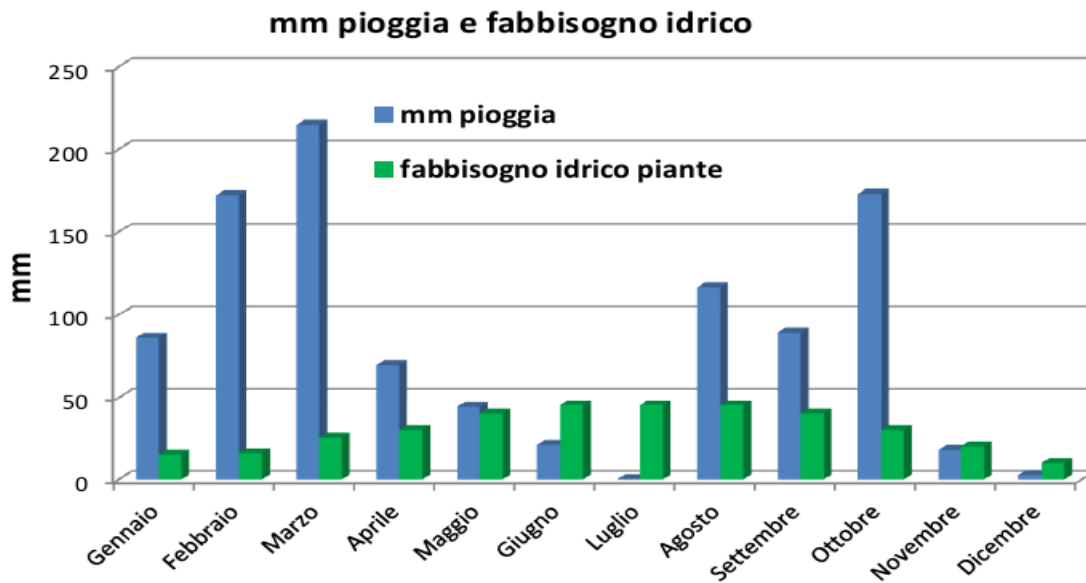
**Tabella 13 - Acqua disponibile minima da garantire al sistema in funzione della localizzazione geografica**

Regioni	Acqua disponibile (l/m <sup>2</sup> )
Valle D'Aosta, Piemonte, Lombardia, Trentino Alto Adige, Veneto, Friuli Venezia Giulia	20
Emilia Romagna, Toscana, Marche, Umbria	25
Liguria, Lazio, Abruzzo, Molise	30
Campania, Basilicata	35
Puglia, Calabria, Sardegna, Sicilia	40

Le figure che seguono mettono in evidenza la necessità di massimizzare la disponibilità di acqua piovana con la necessità idrica delle essenze vegetali (per comodità posta a 2 mm/m<sup>2</sup>/giorno) in accordo con i periodi in cui è alta la piovosità nell'area a nord di Roma (Figura 15 e Figura 16).



**Figura 15 - Disponibilità di acqua ed esigenze idriche delle essenze vegetali in estate ed inverno**



**Figura 16 - Disponibilità di acqua ed esigenze idriche delle essenze vegetali**

La raccolta dell'acqua piovana in serbatoi è in generale un elemento indispensabile per assicurare la sostenibilità del sistema vegetale per gli edifici. Siccome una delle principali difficoltà nell'utilizzo di serbatoi di raccolta è data dalla mancanza di spazio, è di fondamentale importanza ottimizzare il dimensionamento del serbatoio in funzione dei coefficienti di deflusso certificati dei sistemi a verde pensile utilizzati e del fabbisogno idrico effettivo. Infatti è da tenere presente che i fenomeni di evapotraspirazione si riducono a fronte di uno scarso sviluppo della copertura verde causato da mancanza di acqua e di conseguenza anche le capacità di raffreddamento dell'aria che dipendono dal sistema vegetale integrato nella struttura esterna dell'edificio. A tal proposito è opportuno sottolineare che le specie vegetali presentano esigenze differenti nei confronti dei volumi di acqua di irrigazione e quindi dei valori di evapotraspirazione che si instaura tra acqua-vegetazione-substrato-microclima. Infatti, quanto maggiore è la copertura vegetale tanto minore sarà la perdita d'acqua per evaporazione (perdita che avviene direttamente dal substrato ed è incontrollata). Per la scelta di vegetazione con basso rateo di traspirazione atteso bisogna riferirsi a dati specifici per ogni singolo genere o specie (Tabella 14) [20].

**Tabella 14 - Criteri qualitativi per la quantificazione della traspirazione**

<b>Traspirazione bassa</b>	<b>Traspirazione elevata</b>
Piante mediterranee	Pianta di altra provenienza
Piccole dimensioni	Elevate dimensioni
Piccola superficie fogliare	Lamine fogliari espanse
Dicotiledoni erbacee	Graminacee
Camefite suffruticose (suffrutici tipici mediterranei)	Emicriptofite (piante erbacee)

In generale, un modo semplice e diretto per calcolare il fabbisogno annuale per le coperture verdi (assimilabili a giardino) è dato da:

$$F_i = A \times f_i$$

dove:

A : area da irrigare in m<sup>2</sup>,

$f_i$  : fabbisogno annuale specifico al  $m^2$  ( $l/m^2$ ) che per l'Italia è compreso tra 60 e 150  $l/m^2$ .

Più in dettaglio, occorre valutare il valore di evapotraspirazione e quindi procedere con il calcolo rispetto al volume di acqua disponibile. Per quanto riguarda l'evapotraspirazione, il suo valore può essere, in prima approssimazione, calcolato attraverso la conoscenza dei parametri relativi alla esposizione, alla umidità relativa, alla temperatura e al vento secondo la formula:

$$E + T + P = A + I$$

dove:

E: acqua evaporata dal substrato di coltivazione,

T: acqua traspirata dalla pianta,

P: perdite per dilavamento,

A: apporto idrico naturale,

I: apporto idrico artificiale (irrigazione).

Il contenuto d'acqua di un sistema idrico per le coperture vegetali a massima saturazione non dice nulla sul volano idrico offerto da quel dato sistema, il parametro utile è invece il volume d'acqua disponibile (Figura 17). Convenzionalmente, all'interno dell'apparato radicale il potenziale dell'acqua (proprietà fisica dell'acqua che, nel substrato, dipende principalmente dalla quantità d'acqua e dalla struttura del substrato) non riesce a scendere al di sotto di -1,5 MPa, pena la morte dei tessuti della radice. L'acqua disponibile in un suolo di coltivazione è data dalla differenza fra il contenuto d'acqua a piena saturazione (detto anche capacità di campo, con potenziale vicino a 0 MPa) e il volume d'acqua residuo nel substrato quando è stato disidratato al punto di appassimento permanente (definito per l'appunto al potenziale idrico -1,5 MPa) come nella formula:

$$VD = CC - PAP$$

dove:

VD : è il volume d'acqua disponibile, riferito all'unità di superficie,

CC: è il volume di acqua alla capacità di campo, riferito all'unità di superficie,

PAP: è il volume di acqua al punto di appassimento permanente, riferito all'unità di superficie.

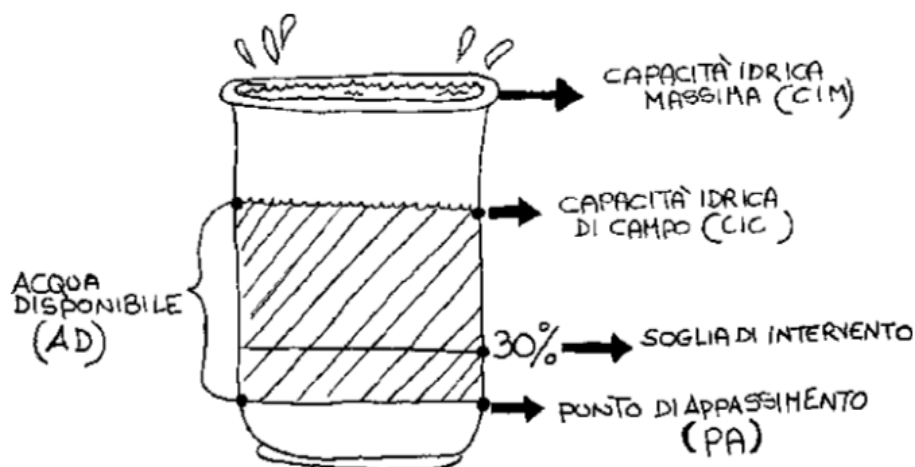


Figura 17 - U.E. FEOGA - P.O.P. 94-99 Misura 6.5 "Razionalizzazione della risorsa idrica"

E' opportuno sottolineare che poiché la sostenibilità delle coperture verdi non può prescindere dall'impiego di acqua piovana, per la realizzazione di sistemi GR e GW nelle aree urbane non è trascurabile considerare

gli andamenti climatici stagionali che caratterizzano il territorio italiano. Sulla base delle esigenze fisiologiche delle piante è pertanto indispensabile nella fase progettuale di una copertura verde una scrupolosa valutazione delle caratteristiche ecologiche con particolare attenzione oltre che alle caratteristiche fenologiche anche alle esigenze idriche. Soluzioni tipiche si riferiscono soprattutto a piante con portamento contenuto, autoctone o comunque adattate a climi caldi e caratterizzate da un ridotto fabbisogno idrico (Tabella 15) [21].

**Tabella 15 - Fabbisogno idrico indicativo di coperture estensive ed intensive**

<b>Fabbisogno idrico per l'irrigazione di coperture a verde pensile</b>	
<b>Tipologia di vegetazione</b>	<b>Fabbisogno annuo (l/m<sup>2</sup>)</b>
Prato all'inglese, alberi e vegetazione mesofila	400
Prato arido, erbacee perenni, <i>Sedum</i> , arbusti xerofili	200

Al fine di dimensionare correttamente il volume di accumulo dei serbatoi per il riutilizzo dell'acqua piovana, si deve fare riferimento alla procedura contenuta nella norma E DIN 1989-1 : 2002-12. Il primo passo consiste nel definire la quantità di acqua Q disponibile nel corso dell'anno utilizzando al seguente formula:

$$Q = P * \eta * A$$

La formula utilizzata deriva dall'equazione razionale. In questo caso però P indica la precipitazione media annuale per il sito considerato. Il secondo passo consiste nel verificare le esigenze idriche dell'edificio in oggetto. La stima del fabbisogno va effettuata come da indicazioni contenute nella norma E DIN 1989-1 : 2002-12. Si procede quindi con il calcolo delle dimensioni del serbatoio con la seguente formula.

$$V = Q * (Psm / GA)$$

dove:

V: è il volume che dovrà avere il serbatoio,

Q: è pari al valore inferiore tra l'acqua disponibile e il fabbisogno annuo per irrigazione e usi domestici,

Psm: è il periodo secco medio, ovvero il numero di giorni durante i quali si può verificare l'assenza di precipitazioni, in letteratura solitamente considerato di 21 giorni,

GA = Giorni dell'anno.

Ove siano previsti sistemi di controllo dell'irrigazione basati su sensori di potenziale elettrochimico nell'acqua, in grado di attivare l'irrigazione gradatamente all'abbassarsi del potenziale percepito e in grado di far convergere il potenziale idrico su valori inferiori a 1,0 MPa, è consentito tenere in considerazione l'effetto di ritenzione del sistema. In altre parole una parte dell'accumulo viene accorpata alla copertura e sottratta al volume del serbatoio. La formula per il dimensionamento sarà in questo caso:

$$V = [Q * (Psm / GA)] - (VD * A)/2$$

dove:

VD è il volume di acqua disponibile del sistema utilizzato;

A è la superficie occupata dal sistema per verde pensile in oggetto.

Nel caso in cui il volume del serbatoio così corretto risulti pari o inferiore a zero, ciò non significa che non vi sia necessità di irrigare, bensì è da considerare che l'efficienza del dispositivo di controllo dell'irrigazione supera il vantaggio ottenibile da un serbatoio dimensionato secondo la norma.

## 8 Coltivazione senza suolo (Soil-less) per le coperture verdi

Il verde rappresenta ormai un elemento importante per migliorare le condizioni ambientali delle città. In particolare, il verde concepito come coperture vegetali realizzate sulle superfici orizzontali e/o verticali degli edifici, è in grado di ridurre le temperature dell'aria e schermare la radiazione solare durante le stagioni di caldo intenso e in questo modo influenzare efficacemente le numerose variabili che determinano il microclima urbano. Al fine di favorire la migliore regolazione della crescita e dello sviluppo delle essenze vegetali, la realizzazione di impianti senza-suolo (sistemi idroponici) si configura la migliore soluzione anche in funzione della razionalizzazione dei consumi idrici e degli elementi chimici per la fertirrigazione delle piante. Soprattutto nelle coperture verdi poste in verticale, l'impianto di irrigazione e/o di fertirrigazione rappresenta un elemento costitutivo del sistema a verde. Per entrambi i casi (coperture verdi orizzontali e verticali), infatti, le conseguenze di una irrigazione o di una concimazione non corretta può causare stress idrici o nutritivi con interventi straordinari per riportare il substrato a una corretta umidità e il sistema vegetale a una crescita ottimale. Inoltre, occorre tenere presente che l'acqua in eccesso e/o il drenato di risulta devono essere opportunamente ripuliti e rimessi in circolo. Questa operazione è necessaria anche per evitare potenziali inquinamenti causati dalle acque con elementi nutritivi che provengono dai sistemi vegetali collocati sulle strutture edilizie.

La coltivazione fuori suolo avviene principalmente grazie a due differenti fattori: il substrato e la soluzione nutritiva. Il substrato solido funge da base d'appoggio per le radici della pianta (ma senza costituirne la fonte di nutrimento come invece accade nelle coltivazioni tradizionali su terreno), mentre la soluzione nutritiva sarà destinata ad apportare all'apparato vegetale le sostanze di cui esso abbisogna per il proprio sviluppo biologico. Tale specifica condizione viene definita fertirrigazione, ed è quella che quasi sempre si incontra quando si abbia a che fare con tecnologie evolute d'inverdimento. Ne deriva che, a livello puramente tassonomico, diviene importante ed obbligatoria una diversificazione pratica: la coltivazione fuori suolo è quindi declinabile come una tipologia di coltura, mentre la fertirrigazione indica l'azione composita fra il mezzo di nutrimento e le modalità della sua distribuzione verso la pianta. Nelle chiusure verticali vegetate e nei muri vegetali la modalità di coltura sarà perciò sempre quella della coltivazione fuori suolo: tipologia di coltura che impiegherà il sistema della fertirrigazione come medium nutritivo a favore delle piante integrate in parete. Le colture fuori suolo (nella terminologia anglosassone sono identificate come soil-less culture) si possono suddividere in base al tipo di supporto della pianta in **colture su substrato** (artificiale, minerale o organico o un mix di questi) e colture **senza substrato**, in cui l'apparato radicale è più o meno immerso in una soluzione nutritiva Tabelle 16 e 17 ([22]).

**Tabella 16 - Vantaggi e svantaggi delle colture senza suolo**

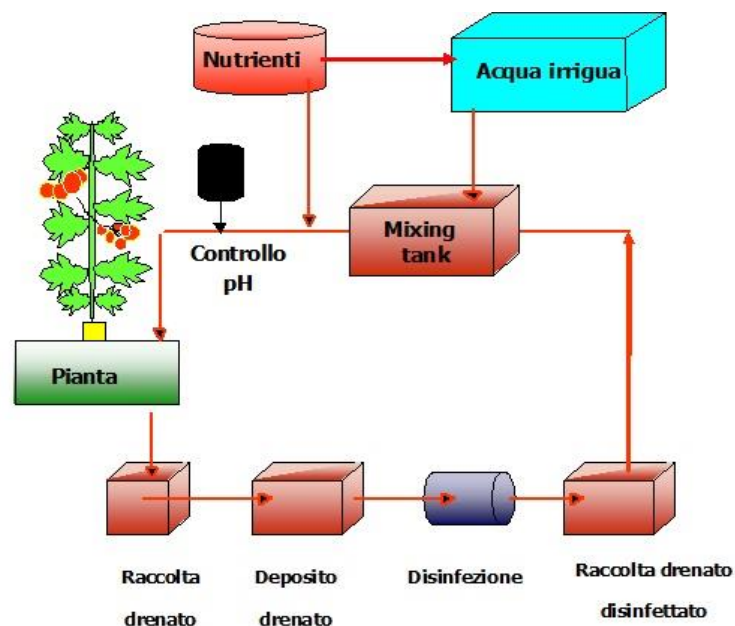
Vantaggi	Svantaggi
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Standardizzazione della produzione.</li> <li>• Migliore controllo delle condizioni fitosanitarie.</li> <li>• Riduzione dell'energia per modificare l'ambiente radicale.</li> <li>• Drastico riduzione del consumo idrico.</li> <li>• Uso efficiente dei concimi e migliore gestione della nutrizione della pianta.</li> <li>• Produzione migliore e anticipata.</li> <li>• Razionalizzazione del lavoro e possibilità di meccanizzare.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Costi d'impianto elevati.</li> <li>• Necessità di tecnici specializzati.</li> <li>• Smaltimento dei substrati utilizzati ed ormai "esausti".</li> <li>• Smaltimento delle soluzioni drenate o esauste, ma contenenti ancora elementi nutritivi.</li> <li>• Maggior uso di materiali difficili da riciclare quale plastica.</li> <li>• Necessità di disporre di acqua di buona-media qualità.</li> <li>• Possibilità di asfissia radicale.</li> </ul>

**Tabella 17 - Descrizione tecnica e caratteristiche delle piante**

Tipologia di Sistema	Descrizione tecnica	Caratteristiche delle piante
Tecniche/tecnologie di coltivazione senza suolo	Substrato, Idroponica	Adatto per qualsiasi taglia
Comunità vegetale costituita da specie erbacee differenti e tra	Si avvale di substrati tipici della coltivazione "senza suolo"	Taglia bassa
Comunità vegetale costituita da specie erbacee a cespuglio e con	Si avvale sia di substrati tipici della coltivazione "senza suolo" e sia di	Taglia semi-bassa

Un altro tipo di classificazione è quella che si basa sul riutilizzo o meno del drenato. Infatti, per motivi tecnologici (disformità tra i punti di erogazione della soluzione nutritiva, differente sviluppo vegetativo delle piante) e per la qualità dell'acqua irrigua (alto contenuto in elementi non essenziali con conseguente necessità di dilavamento per evitare il loro accumulo) è necessario dare un quantitativo di soluzione nutritiva superiore a quella evapotraspirata dalla coltura, ottenendo così un percolato denominato drenato: se questo è raccolto e, dopo essere opportunamente reintegrato, è ri-somministrato alla coltura si parla di **ciclo chiuso** (Figura 18), mentre se questo è utilizzato su una coltura su suolo o peggio se è scaricato nell'ambiente si parla di **ciclo aperto**. In generale, gli elementi di una coltura idroponica sono sostanzialmente quattro:

1. (nelle colture in contenitore) un substrato inerte e sterile, di origine naturale (torba, pomice, sabbia,..) od artificiale (perlite, argilla espansa, lana di roccia), con la funzione di sostenere la pianta ed assicurare un certo volano chimico e fisico (idrico e termico);
2. una soluzione nutritiva con particolari caratteristiche chimiche (pH, EC, composizione salina);
3. un sistema di erogazione della soluzione nutritiva in grado di fornire continuamente o con un'elevata frequenza la soluzione nutritiva alle piante;
4. un sistema di controllo delle soluzione nutritiva (non necessariamente automatico o computerizzato).



**Figura 18 - Lay-out di un sistema idroponico avanzato**

In modo estremamente sintetico, due sono i principi fondamentali dell'idroponica rispetto alla sua applicazione per le coperture verdi:

- un ambiente radicale sano, se non proprio sterile, poiché la soluzione nutritiva ricircolante e l'assenza di un volano microbiologico in grado di contenere la virulenza dei patogeni determinano le condizioni per una rapida diffusione delle malattie a carico dell'apparato radicale;
- una soluzione nutritiva equilibrata dal punto di vista chimico-nutrizionale.

La prima condizione può essere garantita da una serie di interventi preventivi, quali il lavaggio e la disinfezione degli impianti e della serra alla fine di ogni coltura, e soprattutto l'impiego di materiale di propagazione sano (preparato quindi in ambienti e in substrati privi di patogeni). La seconda condizione è garantita, oltre che dalla scelta di un formula nutritiva adeguata, da un continuo monitoraggio e aggiustamento della soluzione (soprattutto nei sistemi chiusi, cioè a soluzione ricircolante), le cui caratteristiche sono più o meno rapidamente modificate dall'assorbimento idrico e minerale delle piante.

### 8.1 Conducibilità elettrica, pH e composizione della soluzione nutritiva

Attraverso la conducibilità elettrica (EC) siamo in grado di misurare il contenuto degli ioni disciolti in quanto tra questi due parametri esiste una stretta relazione (una concentrazione salina pari ad 1 grammo per litro corrisponde ad un valore di EC di circa 1.4 mS/cm). La EC in realtà non ha un significato fisiologico in quanto i vari ioni hanno un diverso effetto in funzione delle caratteristiche fisiche (carica e dimensione). Le soluzioni nutritive hanno generalmente i valori di pH e di EC tra 5,5 e 6,5 e tra 1.5 - 3.5 mS/cm; EC varia in funzione della concentrazione nutritiva e della qualità dell'acqua utilizzata per la soluzione.

Le specie vegetali hanno una notevole capacità di selezionare gli ioni minerali assorbiti in rapporti adeguati alle proprie esigenze. Sono state proposte soluzioni di tipo universale con rapporti precisi tra i cationi (45; 35; 20, tra potassio, calcio e magnesio espressi in equivalenti) e tra gli anioni (60; 5; 35, tra nitrati, fosfati e solfati); d'altra parte, lo stesso autore precisa che variazioni delle concentrazioni nutritive all'interno di un intervallo abbastanza grande non influiscono significativamente sulla crescita e sullo sviluppo delle piante in virtù della loro capacità di regolare il proprio stato nutrizionale. In effetti, l'idea di una *ricetta nutritiva specie-specifica* espressa da diversi ricercatori di diversa nazionalità non sembra avvalorata da dati sperimentali certi. Da un punto di vista applicativo si possono comunque individuare tre tipi di formula nutritiva, i quali si differenziano sostanzialmente soltanto per l'azoto ed il potassio.

Nel caso di colture con produzioni meno ingenti dal punto di vista quantitativo, le soluzioni hanno generalmente concentrazioni di elementi nutritivi decisamente inferiori rispetto alle precedenti, pur rimanendo sostanzialmente invariato il rapporto N/K (circa 2 in termini molari). Conoscere il tasso di crescita di una coltura, funzione non solo delle caratteristiche genetiche ma anche delle condizioni colturali ed ambientali, è fondamentale per una corretta scelta e reintegrazione delle soluzioni nutritive. Più elevata è la produzione di biomassa, maggiori sono le esigenze nutritive e più facilmente possono insorgere degli squilibri nutrizionali.

Nel caso di colture a tasso di crescita limitato, invece, la specificità della composizione della soluzione nutritiva è decisamente meno importante e l'uso di formule *standard* trova maggiore fondamento. Si pensi, ad esempio, agli impianti per l'accrescimento di coperture vegetali in contenitori o vaso, dove vengono allevate insieme specie diverse, usando la stessa soluzione nutritiva e confidando, più o meno consapevolmente, nelle minori esigenze delle piante determinate proprio dal loro ridotto tasso di crescita. In sintesi, si tratta non tanto di individuare la formula nutritiva ottimale per le diverse specie, quanto di determinare le quantità di nutrienti da somministrare alla coltura nelle diverse fasi di sviluppo ed in funzione delle condizioni ambientali. Occorre inoltre ricordare che nel caso di un elevato accrescimento delle piante l'assorbimento radicale rende squilibrata la soluzione nutritiva in poco tempo, obbligando così a compiere operazioni di reintegro e di rinnovo con maggiore frequenza. Per le coperture vegetali la coltivazione senza suolo risulta efficace soprattutto nelle coperture verdi collocate aderenti alle pareti degli



edifici poiché consente di svincolare la pianta e l'edificio dall'occupazione di suolo pubblico. La gestione di una coltura fuori suolo si concretizza nel corretto pilotaggio dell'irrigazione, nel rifornimento nutritivo e nel mantenimento dei valori di EC ed di pH del substrato e del drenato entro i limiti impostati. Naturalmente nella gestione del ciclo aperto (e cioè quando la soluzione drenata non viene re-utilizzata sulla stessa coltura) è assai importante gestire al meglio il pilotaggio dell'irrigazione in quanto un eccesso di drenato si traduce automaticamente in un costo maggiore per l'agricoltore e in un maggior pericolo per l'ambiente, mentre è abbastanza semplice il controllo del rifornimento minerale. All'opposto, nella gestione a ciclo chiuso, il fine pilotaggio dell'irrigazione assume un'importanza minore, mentre fondamentale è il controllo e la modalità di reintegro dei nutrienti nella soluzione nutritiva ricircolante [23].

L'impianto in contenitore è sempre più critico di quello in piena terra in quanto, se nel caso di collocazione a terra gli apparati radicali potrebbero raggiungere uno sviluppo pressoché infinito, unitamente al fatto di poter contare su una riserva idrica potenziale maggiore, nel caso della sistemazione in contenitore eventuali errori di progettazione agronomica potrebbero tradursi in scompensi alla pianta più o meno gravi, finanche addirittura alla sua morte. Sarà perciò necessario prestare adeguata attenzione al dimensionamento del volume di substrato all'interno dei contenitori, in quanto un volume troppo esiguo limiterebbe la crescita nel tempo del vegetale. Inoltre, essendo di fatto la collocazione in contenitore una configurazione d'impianto che è possibile definire come "artificiale", saranno altrettanto importanti la corretta composizione e il bilanciamento degli elementi che andranno a realizzare i vari substrati all'interno dei vasi: essa dovrà, prima di tutto, risultare non eccessivamente pesante al fine di non gravare sulle strutture principali dell'edificio; inoltre, tali substrati dovranno presentare un adeguato rapporto tra le proprietà drenanti e quelle di ritenzione idrica. Gli organi radicali necessitano di ossigeno per il proprio sviluppo, perciò l'acqua stagnante potrebbe creare il decesso delle radici per asfissia; per contro, sarà sempre importante assicurare un'adeguata presenza idrica all'interno delle fioriere, come riserva per la pianta. Il sistema automatizzato diviene invece quasi obbligatorio quando i vegetali non sono piantati a terra. Come visto, nel caso delle specie in vaso il substrato presente – che funge da riserva idrica all'apparato vegetale – è molto limitato perciò, un'eventuale mancanza imputabile alla figura deputata ad annaffiare le piante, potrebbe avere conseguenze gravi. Tale mancanza (o dimenticanza) si rivelerebbe particolarmente deleteria nei casi di temperature molto alte, in cui un'assenza irrigua anche di soli pochi giorni potrebbe essere fatale al sistema. Perciò, nel caso di rivestimenti ottenuti tramite l'impiego di vasi o fioriere, l'impianto d'irrigazione andrà considerato obbligatorio. Altrettanto importante la questione diametralmente opposta, ossia quella di un possibile eccesso di apporto idrico. Particolare attenzione dovrà essere dedicata in fase di progettazione agronomica e pedologica riguardo al problema dell'eccesso di acqua o del ristagno della stessa. Alcune piante possono temere il ristagno idrico nel terreno, o non dimostrarsi idonee all'impianto in contenitori e fioriere. Un ulteriore discorso riguarda la somministrazione di nutrienti alle piante, ossia le varie pratiche di fertilizzazione e concimazione: esse si rivelano necessarie nell'eventualità che i vegetali presentino degli scompensi nutrizionali. È possibile, infatti, che la somministrazione idrica e i nutrienti contenuti nel terreno o nei substrati non siano sufficienti alle piante, ma sia necessario intervenire in modi supplementari, integrando l'apporto idrico con delle sostanze organiche o minerali (ad esempio è da sempre molto utilizzato il sangue di bue, ma esistono un altissimo numero di fertilizzanti di varie derivazioni).

Anche la pratica della fertilizzazione può essere eseguita sia manualmente che sfruttando l'eventuale sistema centralizzato d'irrigazione (facendogli in quel caso distribuire acqua integrata da nutrienti appositamente selezionati e dosati in funzione delle necessità del sistema): tale attività viene definita fertirrigazione. Essa, correntemente usata con le chiusure verticali vegetate, sarebbe possibile anche nel caso di rivestimenti a verde, anche se nella realtà viene raramente impiegata. Ciò perché un impianto di fertirrigazione è più costoso di un semplice sistema d'irrigazione automatizzato, più difficile da usare o programmare e richiedente l'intervento di persone esperte nel dosaggio dei nutrienti, in quanto un eccesso di sostanza nutritiva potrebbe essere deleterio per la pianta.

La gestione di un **sistema senza suolo a ciclo aperto** prevede l'erogazione della soluzione nutritiva *fresca* (cioè con i valori desiderati di pH, EC e concentrazione nutritiva) in eccesso rispetto alle effettive esigenze. Una così semplice gestione determina però uno spreco di acqua e di concimi con gravi conseguenze dal

punto di vista ambientale (inquinamento delle falde idriche); ricordiamo che il volume di drenato in una soluzione a ciclo aperto può arrivare anche al 50-80%. Il problema che si incontra con le colture idroponiche a ciclo aperto è quello relativo al controllo della situazione chimico-nutrizionale (pH, salinità totale, concentrazione di nutrienti e di elementi estranei come il sodio) attraverso un campionamento della soluzione di drenaggio. In questi sistemi è fondamentale anche una gestione attenta dell'irrigazione allo scopo di ridurre il volume della soluzione drenante. A causa del movimento della soluzione nutritiva nel substrato e della formazione di gradienti chimici, è preferibile ricorrere a periodiche analisi chimiche della soluzione all'interno del substrato, in modo da stabilire i tempi e le modalità con cui effettuare il dilavamento della matrice per prevenire un accumulo eccessivo di sali.

La presenza del substrato ed il limitato flusso della soluzione nutritiva rendono meno agevole il rimescolamento tra la soluzione erogata dall'impianto a goccia e quella presente nella rizosfera. Questo fatto determina la formazione di gradienti verticali ed orizzontali di salinità e pH rendendo impossibile un controllo della zona radicale basato solo sulla analisi del drenato. Il substrato di coltivazione diviene perciò l'elemento più importante ai fini dell'efficienza energetica, in quanto incide sulle proprietà di resistenza ed inerzia termica: caratteristiche che, peraltro, dipenderanno non solo dalle peculiarità del materiale che forma il substrato stesso, ma anche dall'entità della presenza idrica riscontrabile, in quanto, come noto, la grande capacità termica dell'acqua ne determina una elevata inerzia.

E' opportuno tenere presente che le tipologie di tetto verde che impiegano sistemi pesanti si possono vantaggiosi in termini di risparmio idrico: il fatto di poter contare su grandi volumi di substrato gioca a favore della diminuzione del consumo d'acqua da somministrare alla coltivazione. Infatti a parità di coefficiente di ritenzione idrica, maggiore è il quantitativo di substrato, più elevata sarà la ritenzione totale del substrato e quindi della copertura vegetale. Diviene quindi possibile, a questo punto, determinare le caratteristiche di efficienza di un substrato in funzione di tre parametri che riescano a descriverne le succitate proprietà intrinseche. Conseguentemente alle caratteristiche di:

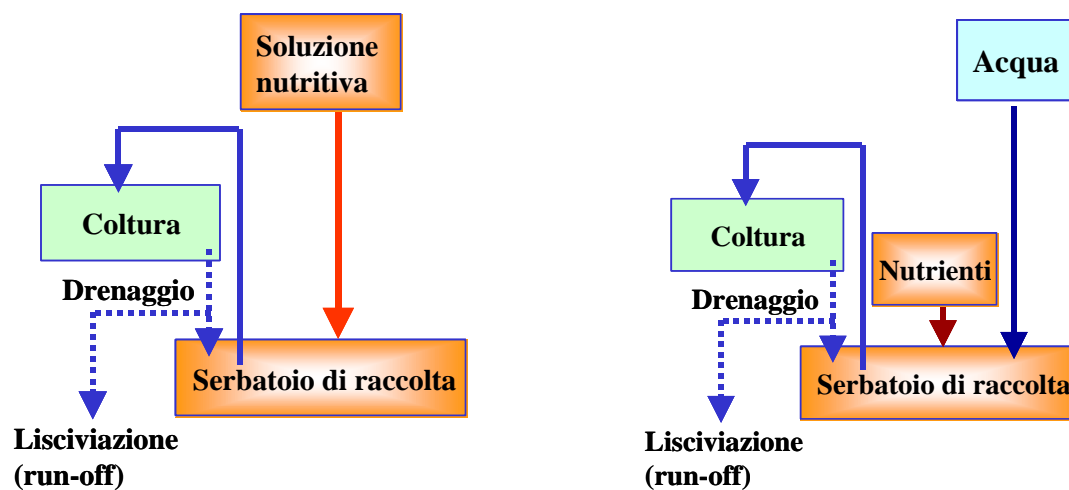
- massa volumica ( $\text{Kg/m}^3$ )
- resistenza termica ( $\text{W/m}\cdot\text{K}$ )
- capacità di ritenzione idrica.

Lo spessore del substrato, soprattutto nella realizzazione di tetti verdi, è il principale parametro per la definizione dei diversi tipi di copertura verde, poiché dal tipo di substrato dipende l'effetto isolante di una copertura a verde sebbene è sempre opportuno tenere conto anche della combinazione piante-substrato. Nelle coperture verdi in verticale il substrato è in funzione del clima, della tipologia di irrigazione e di sistema senza suolo che si intende adottare per la crescita delle essenze vegetali. Nei **sistemi senza suolo a ciclo chiuso** è possibile ridurre il consumo di acqua e fertilizzanti, ma si ha il problema di una possibile diffusione di patogeni radicali che obbliga ad installare degli impianti per la sterilizzazione della soluzione nutritiva (lampade UV, pastorizzatori, filtri, ecc.).

La correzione del pH e la reintegrazione degli elementi nutritivi rappresentano un punto importante a causa del ridotto volume di soluzione in circolo (pochi litri per pianta) e, conseguentemente, della ridotta inerzia del sistema. Il ricircolo continuato della soluzione nutritiva determina un suo più o meno rapido invecchiamento, in funzione dello stato fenologico della pianta e delle condizioni ambientali ed, in special modo, della qualità dell'acqua utilizzata. Si rendono così necessari analisi accurate, continue reintegrazioni e periodici rinnovi. E' possibile individuare e effettuare il monitoraggio attraverso la semplice rilevazione dei valori di pH e di EC con apparecchiature manuali o, ovviamente, con sistemi computerizzati. Per l'automazione del processo di reintegro della soluzione nutritiva occorre stabilire con esattezza l'assorbimento minerale da parte delle piante effettuando la rilevazione della variazione della concentrazione nutritiva. Dalla misura di EC non si ottiene una misura accurata dell'assorbimento minerale; la lettura di EC dipende dalla concentrazione di tutti gli ioni (sia quelli nutritivi che quelli non essenziali e potenzialmente tossici come sodio e cloruro) e, poco tempo dopo la preparazione della soluzione, il valore di EC non è più correlato alla concentrazione nutritiva.

## 8.2 Rifornimento dei nutrienti nella coltura fuori suolo.

Nella coltura fuori suolo il rifornimento minerale è sempre abbinato a quello idrico. Nel ciclo aperto, il rifornimento minerale è assicurato dalla somministrazione di soluzione sempre nuova e di composizione certa. In questo caso, l'utilizzo di una ricetta con concentrazioni dei vari elementi il più possibile simili alla concentrazione di assorbimento delle piante (rapporto fra la quantità di elemento e di acqua assorbita in un determinato periodo di tempo) garantisce che il rifornimento di nutrienti sia adeguato alle esigenze della coltivazione. Nel ciclo chiuso, invece il problema è assai più complicato, in quanto occorre reintegrare gli elementi nutritivi assorbiti dalla pianta. La tecnologia attuale di reintegro dei nutrienti, sia nei sistemi di fertirrigazione computerizzati, sia nei sistemi con semplici pompe volumetriche, si basa principalmente sulla misura della EC e del pH della soluzione da correggere e sulla aggiunta di soluzioni concentrate di acidi e nutrienti a questa fino al raggiungimento delle soglie pre-impostate. Il sistema di controllo degli elementi nutritivi presenti in una soluzione nutritiva sulla base della misura di EC è un sistema efficace ma non efficiente, soprattutto se si utilizzano acque contenenti buone quantità di elementi non-essenziali, come del resto si verifica in quasi tutto il bacino del Mediterraneo. Infatti, la EC di una soluzione è strettamente correlata alla somma totale di elementi nutritivi solo al momento della sua preparazione; successivamente si osserva un progressivo sbilanciamento dei rapporti tra i diversi elementi minerali a favore di quelli che, relativamente alle concentrazioni di partenza, sono assorbiti in misura minore. Pertanto la misura di EC non permette di sapere quanti nutrienti sono presenti e sono quindi necessarie periodiche analisi chimiche. Si riconoscono due principali metodi [24] per il reintegro dei nutrienti nelle soluzioni riciccolanti (Figura 22).



**Figura 19 - Differenti sistemi di reintegro dei nutrienti nelle soluzioni riciccolanti dei sistemi a ciclo chiuso. A destra: opzione a conducibilità costante; a sinistra: opzione con concentrazione dei nutrienti costante.**

a) reintegro della soluzione nutritiva con nutrienti sulla base della conducibilità elettrica della soluzione riciccolante. Questo sistema, definito a “**conducibilità costante**” si caratterizza per mantenimento costante della EC della soluzione riciccolante. Tuttavia questo sistema deve necessariamente disporre di acque buone, con concentrazioni non eccessive di calcio e magnesio (non superiori alla  $C_0$  della coltura) e basse di ioni non-essenziali come sodio e cloro, per evitare che un loro progressivo accumulo provochi una riduzione dell’aggiunta di nutrienti da parte del fertirrigatore con conseguente sviluppo di carenze minerali.

b) il reintegro dei consumi di soluzione nutritiva è effettuato non con semplice acqua, ma con soluzione di nuova formulazione. Questo sistema, detto anche a “**concentrazione dei nutrienti costante**”, si caratterizza per un mantenimento più o meno costante della concentrazione dei nutrienti e per un progressivo

aumento della EC della soluzione nutritiva all'aumento della concentrazione degli ioni non-essenziali. Questo sistema è più adatto all'utilizzo di acque saline in quanto l'accumulo di sali non essenziali è indicato dall'incremento di EC. Tipicamente i sistemi che utilizzano questa modalità di reintegrazione, presentano un andamento della conducibilità elettrica oscillante fra una EC minima e una EC massima la conducibilità aumenta più o meno lentamente secondo la qualità dell'acqua irrigua e della evapotraspirazione del sistema fino a raggiungere una soglia massima di tolleranza tipica della coltura ( $EC^{max}$ ). Successivamente è necessario un rinnovo totale o parziale della soluzione ricircolante, riportando a livelli inferiori la EC della soluzione nutritiva. Per entrambi i metodi, sono consigliate periodiche analisi della soluzione ricircolante come controllo di *routine* per la scoperta di eventuali anomalie. In ogni caso il pH della soluzione nella vasca di ricircolo viene monitorato in continuo; gli strumenti di monitoraggio sono di norma associati a micro-pompe dosatrici in grado di erogare quantità di acido o basi tali da ripristinare le condizioni di pH ottimali per la coltura; in assenza di tali dispositivi automatizzati la correzione viene effettuata manualmente.

### 8.3 I controlli da compiere e la risoluzione di eventuali problemi

I controlli da effettuare nella gestione di una coltura fuori suolo a ciclo chiuso sono i seguenti:

- a) **misura della quantità di drenato prodotto.** La quantità non dovrebbe mai scendere sotto la media giornaliera del 10-20% nel ciclo aperto del 50-70% (quantità drenata/quantità somministrata) nel ciclo chiuso: eventuali diminuzioni indicano o una riduzione della quantità di irrigazione data o un aumento nella domanda evapotraspirativa della coltura e del clima;
- b) **misura della EC e del pH del drenato raccolto.** Il valore non si dovrebbe discostare di 0.5 punti rispetto ai valori pre-stabiliti per la soluzione in entrata. La prima cosa da fare in caso di anomalia è quella di controllare il buon funzionamento del fertirrigatore (sonde, set-point impostato, funzionamento delle pompe). Successivamente, se il problema persiste si può cercare di risolverlo come di seguito descritto :
  1. **Aumento della EC del drenato:** può essere causato da eccesso di salinità nel substrato per insufficiente drenaggio o da un accumulo di sali nella soluzione ricircolante. I rimedi sono di aumentare la frazione di drenaggio, di reintegrare l'evapotraspirato con acqua a basso contenuto di sali e al raggiungimento della soglia di EC massima tollerata dalla coltura, scaricare la soluzione ricircolante esausta.
  2. **Diminuzione del pH nel drenato:** può essere determinato da un'eccessiva quantità di azoto ammoniacale nella soluzione nutritiva. In questo caso, occorre sostituire parte o tutta la quantità di ammonio con la forma nitrica. Anche la presenza di acque con bassi livelli di bicarbonato spesso si traducono in facili sbalzi di pH, dovuti al ridotto potere tampone di questa nei confronti dell'assorbimento radicale selettivo. Conviene quindi arricchire la soluzione nutritiva di 0.5-1 mMol di bicarbonato di potassio e innalzare il set-point di acidificazione.
  3. **Innalzamento del pH nel drenato:** può essere dovuto a:
    - una ridotta quantità di azoto ammoniacale nella soluzione nutritiva, che andrà quindi aumentata fino al 20% della quantità totale di N totale; tuttavia non superare 2 mmol/L di ammonio per evitare, specie in condizioni di elevate temperature, effetti di fitotossicità;
    - un'incompleta neutralizzazione dei bicarbonati: nel caso di sistemi "a vaso chiuso" cioè dove l'iniezione dell'acido è fatta in linea sotto pressione; in questi casi, in presenza di alte quantità di bicarbonato, può accadere che la reazione di neutralizzazione non avvenga completamente, per l'impossibilità ad allontanarsi della anidride carbonica che si produce nella reazione stessa. L'installazione di un contenitore "aperto" dove riversare la soluzione preparata dal fertirrigatore e da qui rilanciarla nell'impianto di irrigazione, può eliminare il problema.

### 8.3.1 Strategie innovative per la gestione della soluzione nutritiva in sistemi chiusi

I sistemi di controllo per le soluzioni riciccolanti sono e saranno nei prossimi anni, oggetto di approfondito studio da parte del mondo della ricerca. Infatti, si stanno sviluppando metodi innovativi per il controllo della nutrizione minerale come ad esempio:

1. uso di kit di analisi rapida: permettono in poche decine di minuti la determinazione dei principali ioni (esempio i kits della Hanna instruments, della Merk ecc). Infatti uno dei problemi maggiori dell'utilizzo di analisi chimiche per la corretta reintegrazione delle soluzioni riciccolanti non è solo il costo ma spesso i lunghi tempi rispetto ad una decisione (come reintegrare) che deve essere presa nel giro di qualche ora.
2. uso di modelli di crescita e di assorbimento minerale. Sono disponibili software e modelli capaci di predire, sulla base di alcuni parametri ambientali (es. radiazione globale e umidità relativa), l'assorbimento di nutrienti nella soluzione. Sono disponibili commercialmente modelli per prevedere la composizione della soluzione nutritiva sulla base della quantità di acqua evapotraspirata dal sistema.

Questi metodi, se implementati in macchine fertirrigatrici dotati di stock monosalini e quindi in grado di variare automaticamente il rapporto tra gli ioni reintegrati e il livello di conducibilità, semplificherà notevolmente la gestione minerale nei sistemi a riciclo. Il sistema preso in considerazione provvede a controllare e reintegrare la soluzione nutritiva riciccolante in modo automatico. Sono comunque necessarie alcune operazioni "manuali", indicate di seguito;

- calibrazione periodica (ogni 15-20 giorni) dei sensori di pH e di EC del fertirrigatore;
- controllo periodico (inizialmente ogni 1-2 giorni e successivamente 1-2 volte alla settimana) dei valori di pH e di EC della soluzione riciccolante;
- verificare la presenza di eventuali precipitati salini nei contenitori delle soluzioni-stock;
- per bilanciare la soluzione nutritiva, controllare ogni 1-2 settimane la concentrazione dei macronutrienti (in particolare azoto) e del cloruro di sodio con kit analitici, se disponibili ;
- se non è possibile analizzare la soluzione, sostituire la soluzione 1 volta al mese.

### 8.3.2 Manutenzione degli impianti

I contenitori delle soluzioni nutritive e le tubazioni di irrigazione con i substrati di coltivazione richiedono di rimuovere i residui delle piante e dei substrati e pulire o sostituire i filtri (in particolare quello del sistema di disinfezione UV). Dopo il lavaggio, l'impianto deve essere disinfettato facendo circolare per almeno 24 ore una soluzione di ipoclorito di sodio (2%) o di sali quaternari di ammonio (1%), quindi accuratamente lavato con acqua dopo la disinfezione. Di seguito di riportano una serie di consigli per la manutenzione e il corretto funzionamento degli impianti di fertirrigazione delle coperture verde su soil-less.

### 8.3.3 Anomalie di funzionamento

#### **L'impianto non parte:**

- ◆ Verificare che l'alimentazione sia disponibile e che i serbatoi siano a livello.
- ◆ Controllare le spie di funzionamento ed i fusibili all'interno del quadro;
- ◆ Controllare che le pompe siano funzionanti.

**Non avviene la correzione di EC**

- ◆ Assicurarsi che la soluzione-stock nei serbatoi sia corretta.
- ◆ Controllare che le pompe siano accese, che il fusibile sia integro e che il tubo di aspirazione sia adescato.
- ◆ Controllare che il conducimetro funzioni normalmente e che i fusibili siano integri.
- ◆ Controllare e calibrare la sonda del conducimento
- ◆ Controllare che i connettori siano inseriti e bloccati.
- ◆ Controllare che i tubi di mandata siano efficienti e che le valvole non siano bloccate.

**Non avviene la correzione del pH:**

- ◆ Assicurarsi che la soluzione acida nel serbatoio sia corretta - se il pH è troppo basso occorre usare una soluzione acida più diluita.
- ◆ Controllare che la pompa sia accesa, il fusibile sia funzionante e che il tubo di aspirazione sia adescato.
- ◆ Controllare che lo strumento pH funzioni normalmente e che i fusibili siano integri.
- ◆ Controllare e calibrare la sonda pH.
- ◆ Controllare che i connettori siano inseriti e bloccati.
- ◆ Controllare che il tubo di mandata sia efficiente e che le valvole non siano bloccate.

**Non avviene la funzione di mandata della soluzione di fertirrigazione:**

- ◆ Controllare che le valvole manuali siano aperte.
- ◆ Verificare che le sonde di livello poste sul bordo delle canalette non siano bloccate.
- ◆ Verificare il corretto funzionamento della pompa di mandata.
- ◆ Controllare che l'elettrovalvola sia funzionante.
- ◆ Controllare se l'impianto è in allarme.

**Non avviene il riempimento con acqua pulita:**

- ◆ Controllare che il serbatoio non sia vuoto.
- ◆ Verificare il funzionamento dell'elettropompa.

**Non funziona il ricircolo della funzione sterilizzatrice:**

- ◆ Controllare che la relativa pompa sia funzionante.
- ◆ Verificare che il filtro non sia otturato.
- ◆ Controllare che la valvola di regolazione sia aperta.

**Il flusso di sterilizzazione è troppo basso:**

- ◆ Pulire o sostituire la cartuccia filtrante.
- ◆ Controllare la pompa di ricircolo.

**La sequenza di lavoro è errata o incompleta:**

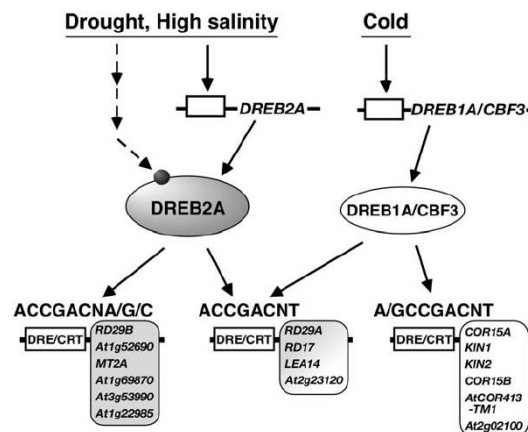
- ◆ Controllare che tutti i selettori siano posizionati su **AUT**.
- ◆ Verificare il buon funzionamento del controllore programmabile.

## 9 Sperimentazioni in corso

Attraverso il programma RDS sono state avviate una serie di ricerche e sperimentazioni che hanno l'obiettivo di selezionare piante geneticamente adatte alla piantumazione su coltri vegetali integrate nelle strutture edilizie delle città e funzionali al compito di favorire il fenomeno della evapotraspirazione. Inoltre, le sperimentazioni in corso rispondono anche all'esigenza di selezionare genotipi capaci di restringere i tempi della maturità fogliare che rappresenta un parametro importante per le coperture verdi.

### 9.1 Attività sperimentale 1: Collaborazione tra Università La Tuscia ed ENEA Casaccia

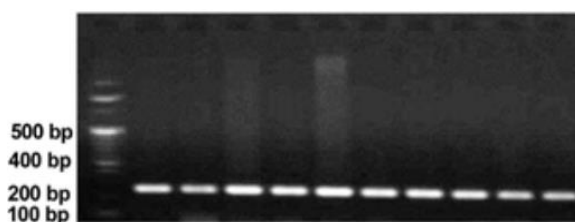
Attualmente è in corso un'analisi molecolare per studiare a livello genotipico la biodiversità esistente tra le specie e le varietà di piante da coltivare/crescere per le pareti verde sfruttando le conoscenze già note su questi geni che rispondono allo stress idrico. Più in dettaglio, la sperimentazione è volta ad identificare la sequenza nucleotidica della regione codificante del gene codificante per l'omologo del DREB2A nelle piante oggetto di studio (Figura 20). Le proteine DREB (dall'inglese *Dehydration Responsive Factor Binding Protein*) sono importanti fattori di trascrizione nelle piante che inducono l'espressione di un set di geni che rispondono agli stress abiotici (stress idrico, stress da freddo e calore) [25].



**Figura 20 - Modello di induzione dei geni regolati da DREB1A e DREB2A in condizioni di siccità, elevata salinità e basse temperature (tratto da: Sakuma et al. Functional analysis of an Arabidopsis transcription factor, DREB2A, involved in drought-responsive gene expression. The Plant Cell 2006.).**

I geni codificanti per i fattori di trascrizione DREB risultano particolarmente interessanti perché la loro over-espressione in sistemi di pianta modello (e non) è correlata ad un maggiore livello di resistenza alla disidratazione. L'attività di ricerca ha previsto:

- Disegno dei primer per l'analisi PCR: le sequenze nucleotidiche dei geni *DREB* sono state ricercate in GeneBank (<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/Genbank>), disponibili solo per alcune specie. Si è utilizzato il software Primer3 (<http://primer3.wi.mit.edu/>) per il disegno degli oligo sulle sequenze selezionate.
- Estrazione di DNA e analisi PCR: E' stato isolato DNA genomico da campioni di foglia delle specie di piante selezionate. L'estrazione è stata fatta utilizzando il kit "PureLink™ Genomic Plant" di Invitrogen. I campioni di DNA sono stati verificati su gel d'agarosio all'1% e la loro concentrazione misurata allo spettrofotometro (Figura 21). Per ogni reazione di PCR sono stati utilizzati 500 ng di DNA genomico. Il prodotto di PCR mostra una banda di 240 bp, come atteso in base alle sequenze di GeneBank.



**Figura 21 - Gel d'agarosio all'1,8% con le PCR per alcuni dei campioni analizzati**

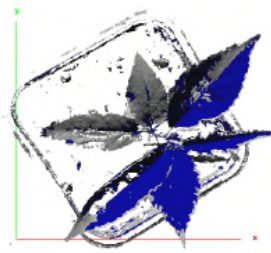
I frammenti di DNA sono stati purificati a partire dalle bande sul gel e sono stati mandati a sequenziare. I risultati delle sequenze verranno analizzati con software bioinformatica, le sequenze verranno allineate e verranno evidenziati gli eventuali SNP (*single nucleotide polymorphism*). L'obiettivo finale è associare dei genotipi attraverso le sequenze e gli SNP. I dati ottenuti verranno poi messi in correlazione con le misurazioni che saranno effettuate sulla parete per le diverse piante. Altri geni della famiglia dei DREB, noti per la loro responsività agli stress abiotici, verranno analizzati nelle specie vegetali per le coperture verdi.

## 9.2 Attività sperimentale 2 : Università La Tuscia, Dipartimento DAFNE

Piante di linee isogeniche di tre genotipi di specie arboree, con diversa sensibilità alla luce e con diversa vigoria alla crescita, sono state esposte a trattamenti di luce red (rossa) per valutare l'importanza della percezione della luce al mattino per attivare la crescita e lo sviluppo giornaliero [26]. Al fine di separare i ritmi circadiani dalla regolazione della luce rossa, che sincronizza l'attività giornaliera della pianta al fotoperiodo, ed il segnale di attivazione è generato dalla luce rossa componente l'alba, ed il segnale fisico in essa contenuto è tradotta in attività biologica dai fotorecettori del fitocrono sono stati effettuati esperimenti di fotobiologia. Con un trasmettitore laser a led e con delle fibre ottiche in grado di modulare l'intensità delle lunghezze d'onda ( $0,02$  fino a  $2 \text{ umol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ), le foglie e gli internodi sono stati esposti per quattro tempi diversi: 5, 10, 15, 20 minuti. La foglia apicale espansa e le due sottostanti foglie, come si vede in foto all'infrarosso, sono state esposte alla luce red, blu e far-red, secondo i 4 tempi menzionati. I risultati evidenziano (Figura 22) la non sensibilità della foglia alla luce rossa e blu. I risultati inerenti l'esposizione del primo internodo alla luce (Figura 23) invece evidenziano che tale struttura della pianta si comporta come organo sensibile. La spiegazione potrebbe essere che: al mattino la possibilità di avere attivo il sistema di trasporto, il sistema di fotosintesi e la funzione dell'interazione tra la parte apicale (chioma) e la parte radicale (apparato assorbente minerali acqua, ed ecc.) della pianta permette alle piante che sono attive precocemente di sfruttare le ore del giorno (alba) per una maggiore attività fotosintetica e di distribuzione degli assimilati. In considerazione del fatto che le ore mattutine sono le ore più fresche in estate, questo permette di prolungare l'attività fotosintetica e un uso migliore dell'acqua rispetto alle piante che non sono reattive o poste in condizioni di non percepire il segnale.

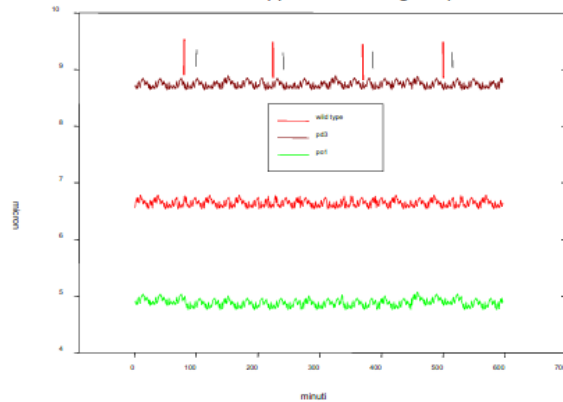


L'irraggiamento con luce rossa (660 nm) è avvenuto esponendo le foglie apicali delle piante a 4 regimi temporali: 5, 10, 15 20 minuti.



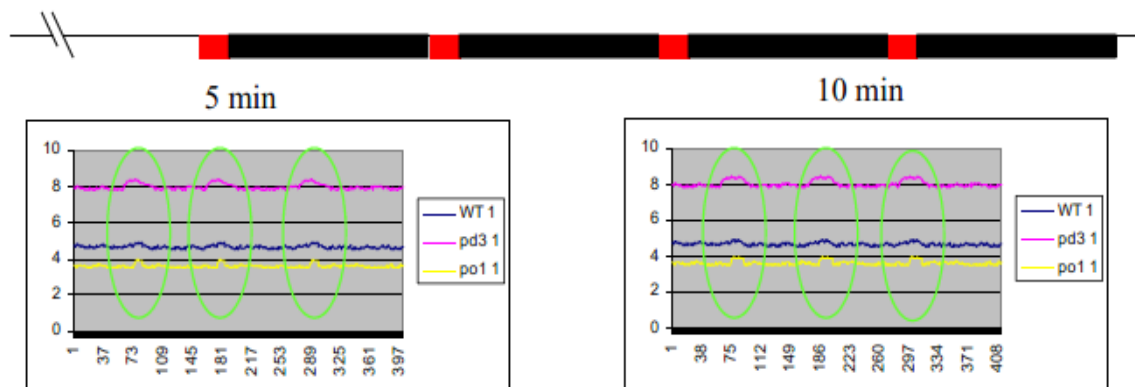
Piante tenute al buio, le cui foglie sono state esposte a 0,2 micromol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> per tempi diversi

Piante tenute al buio per 3 giorni. Luce rossa applicata alla foglia apicale

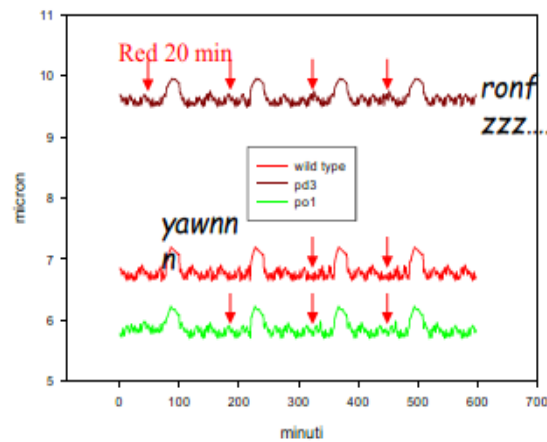


Le piante non danno alcuna risposta allo stimolo luminoso intercettato dalle foglie apicali. L'assenza di risposta è stata osservata per i 4 tempi di esposizione.

**Figura 22 - Evidenza della non sensibilità della foglia alla luce rossa e blu**



Piante tenute al buio per 3 giorni. Luce rossa applicata all'internodo.



**Figura 23 - Evidenza del comportamento della pianta come organo sensibile**

## 10 Conclusioni

L'integrazione dei tetti verdi e delle pareti verdi nei confronti del costruito risponde alle esigenze sempre più pressanti di riqualificazione e ammodernamento energetico ed ambientale degli edifici. L'impiego delle essenze vegetali apre forti possibilità per lo sviluppo e la diffusione di innovazione nel settore dei sistemi vegetali urbani, in particolare per l'applicazione di coperture verdi negli edifici. Infatti, uniformare prassi e sistemi tecnologici per le coperture verdi si rivelerebbe un passaggio di forte innovazione: semplificazione e standardizzazione che, considerato lo stato dell'arte industriale e produttivo delle tecnologie del verde nelle aree urbane (nella maggioranza dei casi ancora troppo dipendenti dalle stesse ditte che operano su questo tipo di mercato), riguardare contribuirebbe alla unificazione dei sistemi per la realizzazione di tetti e facciate verdi, in tutte le condizioni funzionali e di forma possibili, con una grande progressione operativa all'interno del settore. Tenuto conto che la diffusione di verde in città lega condizionamento atmosferico e proprietà vegetali con vantaggi per il microclima urbano in termini di raffrescamento passivo, legato all'evaporazione dell'acqua, che permette alle piante di dissipare energia mantenendo la propria temperatura sempre prossima o inferiore a quella dell'atmosfera, la realizzazione di sistemi vegetali urbani contribuisce anche a migliorare la sostenibilità energetica ed ambientale delle città. Tuttavia, l'impiego dell'acqua come elemento energetico di base ne comporta un consumo di ingenti quantitativi e pertanto una attenta selezione nei confronti sia di specie vegetali da impiegare e sia della disponibilità di acqua piovana, in relazione alle richieste delle essenze utilizzate nella copertura verde, è certamente prioritaria per il progettista della copertura verde. A questo proposito, non è secondario sottolineare la necessità di approfondire la ricerca relativamente all'elemento vegetale in termini di selezioni vegetali con basse richieste idriche e rispetto funzionali in termini di portamento e manto fogliare della pianta oltre alla resistenza alle fitopatie, soprattutto quando integrate per riqualificare gli edifici nelle aree metropolitane. Le attività di ricerca finora svolte dal gruppo DAFNE hanno permesso di ampliare le conoscenze necessarie alla comprensione e alla quantificazione dei parametri bio-agronomici ed energetici che condizionano il successo dell'investimento a verde sugli edifici. In particolare, il gruppo di ricerca sviluppato sono state sviluppate le seguenti indagini:

- definizione dello stato dell'arte sulla tematica oggetto d'indagine, con particolare attenzione alle caratteristiche biologiche ed agronomiche delle essenze vegetali;
- procedure per lo studio del fenomeno della evapotraspirazione e del parametro LAI.
- indagine sui sistemi senza suolo per le coperture a verde intensive ed estensive;
- elaborazione di un modello per la messa a punto di un Sistema di Supporto alle Decisioni (DSS);
- caratterizzazione dei flussi energetici nella tipologia di copertura vegetale "tetto verde";
- individuazione di ulteriori linee di approfondimento scientifico e/o tecnologico per lo studio delle caratteristiche genetiche che condizionano la crescita e lo sviluppo delle piante per le coperture verdi.

Occorre sottolineare che al verde integrato nell'edilizia finora è stata attribuita principalmente una funzione decorativa e rappresentativa che ha avuto come conseguenza che il verde finora non ha avuto una regolamentazione sistematica in ordine alle esigenze biologiche ed agronomiche delle essenze vegetali e alla specificità dei cicli colturali quando questi ultimi si svolgono in ambienti microclimatici specifici come quelli che ormai caratterizzano le aree metropolitane. Infatti, la dimensione delle superfici costruite che caratterizza gli agglomerati urbani di numerose città altera spesso, a svantaggio degli stessi abitanti, parametri di temperatura, umidità, intensità della radiazione solare ed emissioni di CO<sub>2</sub> che definiscono il microclima urbano. La diffusione dei sistemi vegetali città sugli edifici riveste importanza oltre che per contenere il deflusso delle acque meteoriche anche ai fini di una prospettiva innovativa in termini di gestione delle acque sotto l'aspetto del recupero e dell'accumulo dell'acqua piovana ma anche per quanto concerne una progettazione degli edifici che consideri il recupero e il filtraggio delle acque grigie degli edifici ai fini dell'impiego delle stesse per le coperture verdi, i giardini, le siepi e gli alberi. La diffusione del verde sugli edifici e più in generale nelle città è importante non soltanto per migliorare gli equilibri climatici, idrologici e idrogeologici delle aree urbane ma anche per aumentare l'efficienza energetica e il decoro delle strutture edilizie, lo sviluppo di nuovi modelli abitativi e la sostenibilità ambientale delle città aree urbane.

## 11 Bibliografia

1. <https://www.epa.gov/heat-islands>.
2. Abram P., Verde pensile in Italia e in Europa, 2006.
3. Norma UNI 11235/2007 – Istruzioni per la progettazione, l'esecuzione, il controllo e la manutenzione di coperture a verde.
4. Abram P., Verde pensile in Italia in Europa, 2006.
5. Katia Perini. 2013. Progettare il verde in città. Una strategia per l'architettura sostenibile. Spazi verdi al suolo. Coperture verdi. Verde verticale. Norme e casi studio.
6. Editore Franco Angeli. Collana Edilizia. Strumenti. Isbn o codice id 9788820453190.
7. Gianni Scudo Ochoa de la Torre José M. 2003. Spazi verdi urbani. Editore: Sistemi Editoriali. ISBN-13: 9788851301323
8. Scudo G., Grosso M., 2009. Pareti verdi. Sistemi Editoriali Esselibri. ISBN 978-88-513-0595-6.
9. Alessandro, G. Barbera, G. Silvestrini, 1987. Stato dell'arte delle ricerche concernenti l'interazione energetica tra vegetazione ed ambiente costruito / S. Alessandro, G. Barbera, G. Silvestrini
10. Quaderno N. 13 CNR.
11. M. Maffei, Eduardo Zeiger, Lincoln Taiz . 1996. Elementi di fisiologia vegetale, Physiologie der Pflanzen (HC), Plant Physiology, Fisiologia vegetale.
12. Pollo R., 2015. Progettare l'ambiente urbano. Carocci editori.
13. Tibbitts. T.W. and Kozlowski. T.T. (eds) Controlled Environment Guidelines for Plant Research. New York: Academic Press, 1979. ISBN 0-12-690950-4.
14. Barclay, H.J. (1998) Conversion of total leaf area to projected leaf area in lodgepole pine and Douglas-fir. *Tree Physiology*, 18, 185–193.
15. Monsi M, Saeki T. 1953. Über den Lichtfaktor in den Pflanzengesellschaften und seine Bedeutung für die Stoffproduktion. *Japanese Journal of Botany*. 1953.
16. Schulze E.D. 1982. Plant life forms and their carbon, water, and nutrient relations. Lange OL, Nobel PS, Osmond CB and Ziegler H, eds *Encyclopedia of plant physiology (new series)*, vol. 128, New York, Springer.
17. Asner G.P. (1998). Biophysical and biochemical sources of variability in canopy reflectance. *Remote Sensing of the Environment*, 69, 171–182.
18. Stull Roland B. 1988. An Introduction to Boundary Layer Meteorology. Springer Science & Business Media, 31 lug 1988.
19. Wong, e. a. (2003). Energy saving with green roof in a five-storey building in Singapore.
20. ASTM International, E1980-11 (2010), Standard practice for calculating solar reflectance index of horizontal and low-sloped opaque surfaces.
21. ISPRA. Verde Pensile: prestazioni di sistema e valore ecologico. Manuali e Linee Guida 78.3/2012.
22. Schulze E.-D., Beck E., Müller-Hohenstein K. (2005). *Plant Ecology*. Springer.
23. Larcher W. (2003). *Physiological Plant Ecology*. Springer
24. Campiotti C., Alonzo G., Balducchi R., Dondi F. 2008. Le tecnologie colturali “senza suolo” per i sistemi serra. RT/2008/9/BAS.
25. Pardossi A., Incrocci L., Marzioletti P. 2015. Irrigazione, fertirrigazione e concimazione delle colture florovivaistiche. Manuale, Regione Toscana.
26. Incrocci L., Leonardi C, 2004. I sistemi di coltivazione fuori suolo a ciclo chiuso. Atti del convegno “La produzione in serra dopo l'era del bromuro di metile”, Comiso (RG), 3/04/2004, pp. 83-92.
27. Latini A. *et al.* Variability and expression profile of the DRF1 gene in four cultivars of durum wheat and one triticale under moderate water stress conditions. *Planta* 2012.
28. Muleo R. 2016. Comunicazione personale.

## 12. Breve curriculum scientifico del gruppo di lavoro

**Nicoletta Ripa**, nata a Blera (VT) il 15 dicembre 1962. Professore Associato nel SSD AGR10 presso il Dipartimento DAFNE (Dipartimento di scienze Agrarie e Forestali) dell'Università della Tuscia-Viterbo dal 30 dicembre 2010. 2000-2010: Ricercatore per il SSD AGR10 presso la Facoltà di Agraria dell'Università della Tuscia-Viterbo. Dal 2000 è stata incaricata di numerosi insegnamenti; attualmente insegna: Assetto del Territorio, Laboratorio di Architettura del Paesaggio, Laboratorio di Pianificazione del Territorio Rurale. La sua scientifica ha riguardato principalmente la pianificazione del territorio, la valutazione degli impatti ambientali delle attività agricole con particolare riferimento alle fonti diffuse di inquinamento, l'analisi dei sistemi ambientali e paesaggistici con riferimento ad ecosystem/landscape services, la gestione di aree protette e di siti della rete Natura 2000. Le ricerche condotte hanno riguardato in particolare: Tecnologie per la cartografia digitale ed i sistemi informativi territoriali: GIS e gestione dell'informazione remota Sistemi informativi territoriali per l'agricoltura e le foreste; la valutazione degli impatti ambientali delle attività agricole con particolare riferimento alle fonti diffuse di inquinamento; i sistemi di supporto alle decisioni (DSS) indirizzati alla pianificazione territoriale; l'integrazione fra GIS e modelli previsionali quali GLEAMS; I modelli gestionali per il controllo dell'inquinamento idrico diffuso e la conservazione del suolo: progettazione delle pratiche ottimali e delle strutture del paesaggio (opere di ingegneria naturalistica, fasce filtro vegetate, boschi ripariali); la progettazione di reti ecologiche. L'attività scientifica della prof.ssa Ripa si è sviluppata anche attraverso la partecipazione a numerosi progetti di ricerca nazionali ed internazionali. E' autore di oltre 90 lavori pubblicati su riviste e in atti di congressi nazionali e internazionali.

**Rosario Muleo** è nato a Catanzaro l'11 febbraio del 1959. Professore Associato nel SSD AGR3 presso il Dipartimento DAFNE (Dipartimento di scienze Agrarie e Forestali) dell'Università della Tuscia-Viterbo dal 1 novembre 1998. Dal 1998 è stato incaricato di numerosi insegnamenti nel settore delle piante arboree; attualmente insegna: Coltivazioni arboree per la qualità della produzione e Biotecnologia delle piante arboree. L'attività scientifica ha riguardato principalmente la pianificazione del territorio, la valutazione degli impatti ambientali delle attività agricole con particolare riferimento alle fonti diffuse di inquinamento, l'analisi dei sistemi ambientali e paesaggistici con riferimento ad ecosystem/landscape services, la gestione di aree protette e di siti della rete Natura 2000. L'attività scientifica del prof. Rosario Muleo ha riguardato, e tuttora riguarda, la comprensione dei meccanismi di regolazione dello sviluppo e della produzione delle piante arboree da frutto. Gli obiettivi delle ricerche condotte perseguono l'ottenimento di varianti somaclonali, la selezione individui da incroci e l'identificazione di genotipi autoctoni con caratteristiche di resistenza a stress abiotici e biotici, e di crescita e sviluppo della chioma idonea ai diversi sistemi di impianto, e con elevate proprietà nutraceutiche e salutistiche. Sin dall'inizio della sua attività di ricerca e sperimentazione il prof. Rosario Muleo ha impiegato tecniche agronomiche ed eco-fisiologiche, arricchite con tecniche di indagini biomolecolari e biotecnologiche, al fine di comprendere come l'informazione inerente il comportamento delle piante sia presente nelle diverse specie e come essa sia regolata nelle risposte adattative delle piante all'ambiente. Tali strumenti sono stati impiegati per ottenere varianti resistenti alla disidratazione, come nel caso dell'*Actinidia deliciosa*, e varianti resistenti all'asfissia radicale come nel caso di un variante di *Prunus cerasifera*, impiegato come portinnesto delle drupacee, resistente a lunghi periodi di asfissia radicale. Infine ha in corso studi: in pesco e in olivo, sul processo di transizione dalla fase giovanile a quella adulta, che genera l'induzione fiorale e, quindi lo sviluppo del frutto; nella comprensione dell'attivazione della radicazione avventizia in talee e in microtalee di piante arboree; nel ruolo della intensità e della qualità della luce e dei suoi fotorecettori nella regolazione dello sviluppo delle piante arboree da frutto. Il Prof. Muleo è autore di oltre 280 lavori pubblicati su riviste nazionali ed internazionali e in atti di congressi nazionali e internazionali, e capitoli di libri.

**Roberto Mancinelli** è Professore Associato nel settore scientifico disciplinare AGR-02 (Agronomia e coltivazioni erbacee) presso il Dipartimento di Scienze Agrarie e Forestali (DAFNE). Ha conseguito la Laurea in Scienze Agrarie nel 1995 e il titolo di Dottore di Ricerca in Scienze Ambientali nel 2001 presso l'Università

degli Studi della Tuscia. Dal 1995 ad oggi [prima nel Dipartimento di Produzione Vegetale e poi nel Dipartimento di Scienze e Tecnologie per l'Agricoltura, le Foreste, la Natura e l'Energia (DAFNE)] ha partecipato a numerosi progetti di ricerca nazionali (DOCUP Ob. 5B - Regione Lazio; PRAL - Regione Lazio; Progetti MiPAF; PRIN - MIUR; ecc.) e internazionali (Interlink; AsiaLink; Seventh Framework Programme, Leonardo da Vinci - lifelong learning programme, Erasmus+; ecc.). I suoi studi e ricerche sono strettamente connessi alla scienza dell'agroecologia come disciplina base di principi ecologici per studio, progettazione, gestione sostenibile degli agroecosistemi che conservano i livelli produttivi e le risorse naturali, e che sono rilevanti culturalmente e socialmente ed economicamente sostenibili. In particolare, gli aspetti specifici delle attività di ricerca riguardano: l'analisi degli agroecosistemi attraverso l'uso di indicatori di sostenibilità a differenti livelli gerarchici (colturale, aziendale e territoriale); la progettazione e gestione di sistemi colturali biologici e convenzionali; lo studio della fertilità del suolo in gestione convenzionale e alternativa; le strategie agronomiche a compatibilità ambientale nel controllo delle erbe infestanti; l'uso delle cover crop per migliorare la sostenibilità dei sistemi colturali in ambiente mediterraneo; lo studio delle emissioni di gas serra e accumulo di C nel suolo in agroecosistemi in regime di agricoltura convenzionale e biologica e in sistemi colturali con alternative tecniche agronomiche. La sua attività scientifica è documentata da oltre 100 lavori pubblicati in riviste nazionali e internazionali.

**Fabio Recanatesi**, Laurea in Scienze Forestali (Indirizzo: Gestione dell'Ambiente). Attualmente docente e ricercatore presso la Facoltà di Agraria dell'Università degli Studi della Tuscia di Viterbo. L'attività di ricerca scientifica ha riguardato le tematiche inerenti la pianificazione del territorio, la valutazione degli impatti ambientali derivanti dalle attività agricole con particolare riferimento alle fonti diffuse di inquinamento, il monitoraggio ambientale e la gestione di aree protette e di siti appartenenti alla Rete Natura 2000. Nello specifico, le sopra citate tematiche, hanno riguardato prevalentemente i seguenti temi: Tecnologie per la restituzione cartografia digitale ed i sistemi informativi territoriali: GIS (Geographic Information Systems) e gestione dell'informazione remota (immagini telerilevate); Sistemi informativi territoriali per l'agricoltura e le foreste; Cartografia tematica per il territorio agricolo e forestale (carte dell'uso e della copertura del suolo, carte del rischio ambientale: erosione, inquinamento idrico diffuso ecc.); Valutazione degli impatti ambientali delle attività agricole con particolare riferimento alle fonti diffuse di inquinamento per il cui controllo è fondamentale la pianificazione di interventi sia sulla componente agricola sia su quella forestale, con la realizzazione di strutture del paesaggio che abbiano la capacità di intercettare ed assorbire gli inquinanti asportati. Integrazione fra GIS e modelli previsionali quali GLEAMS (Groundwater Loading Effects of Agricultural Management Systems) ed USLE (Universal Soil Loss Equation). Ad oggi, la produzione scientifica è composta da oltre 70 lavori pubblicati su riviste e in atti di congressi nazionali ed internazionali.

**Stefano Speranza**, laurea in Scienze Agrarie, entomologo del Dipartimento DAFNE. Si occupa di progetti nazionali ed internazionali in entomologia applicata. Attualmente è docente e ricercatore. Coordina due progetti internazionali con il sudamerica per lo studio del controllo dei fitofagi autoctoni e di nuova introduzione sul territorio europeo con metodi a basso impatto ambientale e di controllo biologico. E' docente dei corsi di Strategie in Entomologia Agraria e Entomologia Forestale di questo Dipartimento. E' responsabile di Ateneo per gli accordi di cooperazione internazionale con l'Università di Cuyo (Mendoza - Argentina), con l'Università nazionale di Chilecito (La Rioja, Argentina), con il CONICET (Argentina), con l'Università Agraria La Molina (Lima, Perù), con l'Accademia delle Scienze Agrarie della Corea del Nord, con l'Università Cattolica di S. Maria (Arequipa, Perù), con l'Università nazionale di San Agustin (Arequipa, Perù), con l'ONG Cooperazione Paesi Emergenti (Co.P.E.), con l'ONG Ricerca e Cooperazione.

**Maurizio Ruzzi** è nato a Roma nel 1961 e si è laureato in Scienze Biologiche presso l'Università degli Studi "La Sapienza" di Roma. Nel corso della sua carriera ha ottenuto diverse borse di studio da istituzioni nazionali (Istituto Pasteur - Fondazione Cenci-Bolognetti, CNR) ed internazionali (Università Heinrich-Heine di Duesseldorf, Germania, e Istituto André Lwoff per la Ricerca sul cancro di Villejuif, Francia). E' stato Ricercatore Universitario ed attualmente è Professore Associato di Chimica e Biotecnologia delle Fermentazioni presso l'Università degli Studi della Tuscia, Viterbo. La sua attività di ricerca è rivolta allo studio della: degradazione microbica di stirene e composti aromatici correlati alla lignina, quali l'acido

ferulico; produzione biotecnologica di vanillina mediante cellule ed enzimi; produzione di enzimi microbici di interesse industriale, in forma nativa ed ingegnerizzata (laccasi fungine ed acilasi attive su capsaicina); messa a punto di metodiche molecolari innovative per la ricerca rapida di patogeni alimentari, patogeni vegetali (*Erwinia amylovora*) e microrganismi responsabili del deterioramento degli alimenti (*Pseudomonas*). E' autore e co-autore di più di 40 lavori pubblicati in qualificate riviste scientifiche internazionali e ha presentato 80 comunicazioni (orali e/o poster) in convegni nazionali ed internazionali.

### 13. Abbreviazioni ed acronimi

Leaf Area Index (LAI).

Solar Reflectance Index (SRI).

Sistema di Supporto alle Decisioni (DSS).

Coefficiente di estinzione di copertura (K).