



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



MINISTERO DELLO SVILUPPO ECONOMICO



Ricerca di Sistema elettrico

Infrastrutture “verdi” per migliorare l’efficienza energetica degli edifici e la qualità del microclima nelle aree urbane

C.A. Campiotti, P. De Rossi, G. Giagnacovo, A. Latini, S. Mariani,
L. Nencini, S. Pace, M. Sperandei

INFRASTRUTTURE “VERDI” PER MIGLIORARE L’EFFICIENZA ENERGETICA DEGLI EDIFICI E LA QUALITÀ DEL MICROCLIMA NELLE AREE URBANE

C.A. Campiotti, P. De Rossi, G. Giagnacovo, A. Latini, S. Mariani, L. Nencini, S. Pace, M. Sperandei

Con il contributo di: L. Colasuonno, S. Di Lonardo, E. Ferretti, F. Hugony, A. Marone, P. Pistochini, F. Zanghirella

Dicembre 2019

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021 - I annualità

Obiettivo: *N. 1 - Tecnologie*

Progetto: *1.5 - Tecnologie, tecniche e materiali per l'efficienza energetica ed il risparmio di energia negli usi finali elettrici degli edifici nuovi ed esistenti*

Work package: *2 - Materiali e soluzioni innovative per ottimizzare l'isolamento dell'involucro edilizio*

Linea di attività: *LA2.1 - Infrastrutture “verdi” per migliorare l'efficienza energetica degli edifici e la qualità del microclima delle aree urbane - Anno 1*

Responsabile del Progetto: Giovanni Puglisi

Responsabile del Work package: Giovanni Puglisi

Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE	5
2 PARETE VERDE	7
2.1 VALUTAZIONE DELLA CAPACITÀ DI ASSORBIMENTO DELLA CO ₂ INDOOR/OUTDOOR: IMPLEMENTAZIONE DELLA SENSORISTICA.....	7
2.1.1 <i>Analisi delle variazioni della CO₂ per la validazione della sensoristica</i>	10
2.1.2 <i>Variazione della concentrazione di CO₂ in relazione alla velocità del vento e ai movimenti d'aria</i>	11
2.2 RILEVAMENTO DATI TERMICI ANNO 2019 SULLA PARETE VERDE DI SUD-EST	12
2.3 COMPOSTI ORGANICI VOLATILI (COV)	23
2.3.1 <i>Normative sui COV</i>	23
2.3.2 <i>Attività di monitoraggio dei COV presenti nell'aria</i>	24
3 TETTO VERDE	27
3.1 SPERIMENTAZIONE SU APPEZZAMENTO A PRATO SPONTANEO	27
3.2 AGGIORNAMENTO SENSORISTICA PER IL MONITORAGGIO MICROCLIMATICO	30
3.3 STUDIO DELL'ALBEDO NEI TETTI VERDI.....	30
4 SERRA BIOCLIMATICA	32
4.1 NORMATIVE	32
4.2 PROTOTIPO ENEA.....	33
4.3 IMPLEMENTAZIONE DELLA SENSORISTICA.....	34
4.4 EVAPOTRASPIRAZIONE DELLE SPECIE VEGETALI.....	35
4.4.1 <i>Stima dell'evapotraspirazione delle colture</i>	36
4.4.2 <i>Il coefficiente colturale K</i>	36
4.4.3 <i>Metodi di misura dell'evapotraspirazione</i>	38
4.4.4 <i>Pianificazione del protocollo di ricerca</i>	38
4.4.5 <i>Bilancio a celle di carico</i>	40
5 INDAGINI SULLO STATO DELL'ARTE NELLE AREE MEDITERRANEE CIRCA LA CAPACITÀ DI ASSORBIMENTO DELL'ACQUA METEORICA DA PARTE DI INFRASTRUTTURE ORIZZONTALI VERDI	41
6 VALUTAZIONE DELL'EFFICIENZA AMBIENTALE DI INFRASTRUTTURE VERDI ATTRAVERSO TECNICHE DI REMOTE SENSING & GIS	45
6.1 IL PROGRAMMA LANDSAT	46
6.2 COPERNICUS, IL PROGRAMMA EUROPEO DI OSSERVAZIONE DELLA TERRA	48
6.3 ULTERIORI SATELLITI UTILIZZATI DI FREQUENTE IN STUDI DI REMOTE SENSING APPLICATO ALL'ATMOSFERA.....	49
6.4 ANALISI DEI PRINCIPALI SOFTWARE DI IMAGE PROCESSING	51
7 INCENTIVI PER GLI EDIFICI VERDI	54
7.1 ECOBONUS PER IL VERDE SUGLI EDIFICI.....	54
7.2 CONTO TERMICO.....	56
7.3 SERRA BIOCLIMATICA.....	57
7.4 BONUS VERDE	57
8 CONCLUSIONI.....	59
9 BIBLIOGRAFIA.....	60

Sommario

Durante il precedente triennio della Programmazione RdS, il gruppo di ricerca è stato impegnato nella realizzazione delle strutture verdi (tetto, parete e serra bioclimatica) presso l'edificio "Scuola delle Energie" F92 del C.R. ENEA Casaccia. I risultati della sperimentazione hanno appurato il ruolo positivo svolto dal "sistema di piante" installato sulla parete e sul tetto nel ridurre le temperature superficiali dell'involucro dell'edificio. Il sistema si è infatti dimostrato capace di creare un vero e proprio cuscinetto isolante che, in particolare nella stagione estiva, è in grado di mitigare i picchi di temperatura catturando al suo interno gran parte dell'energia solare che così non viene assorbita in modo diretto dalla superficie dell'edificio.

Nel triennio in corso 2019-2021, oltre a proseguire lo studio sugli impatti termici della vegetazione per la conferma dei risultati in esperimenti di lunga durata, si vuole prendere in considerazione l'utilità dei tetti e pareti verdi (*green roofs and green walls*) nel contrasto ai cambiamenti climatici, ormai in atto e riconosciuti dalla comunità scientifica internazionale. I risultati previsti serviranno per avere ulteriori conferme tecniche e scientifiche che il verde sugli edifici e le infrastrutture di verde urbano i.e: parchi cittadini, viali alberati, ecc., non costituiscono soltanto un decoro urbano, ma sono funzionali anche come misura di adattamento alle condizioni climatiche estreme (eventi meteo, caldo eccessivo, ecc.) oltre che per migliorare la sostenibilità energetica ed ambientale delle città.

In particolare, l'attività riguardante i **tetti verdi** è volta al monitoraggio microclimatico a livello tetto e allo studio dell'influenza di diverse essenze vegetali rispetto alle variazioni termiche. Verranno selezionate le specie più adatte a favorire una percentuale più elevata di riflessione della radiazione solare (elevato albedo).

Per quanto riguarda le **pareti verdi**, gli obiettivi principali sono il monitoraggio della concentrazione di CO₂ nell'aria in relazione al periodo vegetativo della pianta, sia a livello della *canopy* fogliare esterna che degli ambienti interni, confinanti con la parete verde, e la verifica della capacità di "cattura" degli inquinanti ambientali appartenenti alla classe dei composti organici volatili (COV) da parte delle essenze presenti sulle pareti.

In relazione alla **serra bioclimatica captante**, i modelli energetici in regime dinamico sviluppati negli anni precedenti hanno mostrato il risparmio energetico conseguibile per la climatizzazione degli ambienti interni confinanti con essa. L'obiettivo attuale è quello di studiare l'effetto evapotraspirativo della vegetazione posta all'interno della serra solare sul raffrescamento interno e degli ambienti confinanti. A questo fine è stata condotta una ricerca bibliografica delle specie vegetali con elevato potenziale di evapotraspirazione che verranno coltivate all'interno della serra. La selezione ha previsto soprattutto specie alimentari in quanto è sempre più diffuso, tra i consumatori, il desiderio di agricoltura urbana che, oltre alle finalità di ordine didattico e sociale, si traduce anche nella coltivazione di frutta e verdura in giardino o sul balcone, con il fine di garantirsi prodotti freschi e sani oltre a quello di contribuire all'economia familiare.

1 Introduzione

Le attività di ricerca realizzate durante l'anno 2019 per la Linea di Attività LA 2.1, dal titolo "Infrastrutture verdi per migliorare l'efficienza energetica degli edifici e la qualità del microclima nelle aree urbane", hanno principalmente riguardato i protocolli per la pianificazione della ricerca nel triennio 2019-2021 e l'implementazione di nuovi sensori ai fini del monitoraggio dei parametri energetici, climatici ed ambientali sulle "strutture verdi" dell'edificio "Scuola delle Energie" F92 del C.R. Casaccia ENEA.

Particolare attenzione è stata posta sulla tematica della decarbonizzazione degli ambienti interno ed esterno dell'edificio prototipo attraverso l'impiego della vegetazione, essendo l'inquinamento atmosferico particolarmente elevato nei centri urbani, dove la qualità dell'aria è fortemente compromessa a causa delle emissioni legate al traffico e agli impianti di riscaldamento. Negli ambienti chiusi (*indoor*), dove la maggior parte delle persone trascorre circa l'80-90% del proprio tempo giornaliero, si registra un inquinamento che deriva da fonti interne - occupanti (uomo, animali), polvere (ricettacolo per i microrganismi), strutture, materiali edili, arredi, impianti (condizionatori, umidificatori, impianti idraulici) - e dall'inquinamento atmosferico esterno (*outdoor*).

Gli edifici sono mediamente responsabili del 40% del consumo globale di energia (*United Nations Environmental Programme*, UNEP) e, nei soli paesi europei, del 36% delle emissioni di gas serra. Le coperture verdi (tetti e pareti) contribuiscono anche allo sviluppo di tecnologie di tipo *nature-based solutions* (NBS) per gli edifici e per la rigenerazione delle città in quanto mitigano gli effetti dei cambiamenti climatici e degli impatti antropici sull'ambiente urbanizzato [1] [2]. Le coperture verdi sugli edifici agiscono da isolanti naturali per ridurre la temperatura degli ambienti interni favorendo un risparmio dei consumi energetici per la climatizzazione nei periodi estivi e una minore dispersione termica in inverno. L'inverdimento degli edifici e delle città, che per molto tempo ha rappresentato un aspetto puramente decorativo, negli ultimi decenni ha acquisito un'importanza significativa rispetto alla sostenibilità energetica-ambientale e al benessere delle persone, soprattutto nelle aree urbane. La presenza della vegetazione nelle aree urbanizzate, infatti, grazie al fenomeno della evapotraspirazione delle piante, contribuisce ad abbassare la temperatura dell'aria circostante, tenuto conto che mediamente occorrono 2.450 J per ogni grammo di acqua evaporata [3].

Tra le funzioni di rilievo delle coperture verdi è rilevante il contributo alla mitigazione del fenomeno delle isole di calore (*Urban Heat Island*, UHI), che si formano all'interno dei centri urbanizzati dove la temperatura dell'aria risulta spesso più elevata di 3-5°C rispetto alle aree rurali limitrofe [4]. A tal proposito, il Ministero della Salute nel recente "Piano Nazionale di Prevenzione degli effetti del caldo sulla salute" (luglio 2019), ha sottolineato che «un programma strutturale a lungo termine dovrebbe prevedere strategie per ridurre l'effetto "isola di calore" urbano, o, più in generale, disegnare modelli di città adatte agli emergenti disagi climatici». La riduzione degli effetti delle isole di calore urbano può essere attuata con strategie che diminuiscono in maniera naturale la temperatura nei periodi estivi, ad es.: aumento delle superficie verdi negli edifici e nelle aree urbane, impiego di materiali con bassa emissività [5]. In particolare, la vegetazione, intesa come "materiale freddo", ha un valore di albedo compreso tra il 20-30%. L'albedo del verde risulta superiore a quello dei materiali artificiali ("materiali caldi", come guaine bituminose, asfalto ecc.) tipicamente utilizzati nelle infrastrutture urbane, il cui valore è compreso tra il 5-10%, che si traduce in valori di temperatura di 60-70 °C nei mesi estivi. Infatti, i fenomeni fisiologici della fotosintesi e della evapotraspirazione (fino a 3-4 l/mq per un verde estensivo) sottraggono parte della radiazione solare incidente ed emettono meno radiazione infrarossa. I vantaggi si riflettono in un minore riscaldamento dell'aria esterna e, quindi, dei livelli di riscaldamento delle superfici adiacenti le coperture verdi con vantaggi per l'edificio e l'ambiente [4].

Una delle misure di mitigazione riconosciute per contrastare questo fenomeno è proprio l'implementazione di tetti e pareti verdi. Il Giappone, per riportare un esempio, ha ufficializzato i tetti verdi come "tecnologia all'avanguardia" da privilegiare per diminuire l'UHI nei centri urbani [6] e per promuovere edifici sostenibili [7]. Il *New York City Council* ha approvato un provvedimento nel suo *Climate Mobilization Act*, dove per la sostenibilità delle città è stata definita l'obbligatorietà di tetti verdi sulle nuove costruzioni sia commerciali

che civili [1]. Altri effetti positivi documentati nella letteratura scientifica riguardano il miglioramento della qualità dell'aria con assorbimento da parte della vegetazione di gas inquinanti (CO₂, COV e particolato) nocivi per la salute umana e per l'ambiente [6] [8].

Relativamente ai tetti verdi, questi consentono anche di mitigare il deflusso dell'acqua meteorica, riducendone la tracimazione dalla rete fognaria durante precipitazioni particolarmente abbondanti ed improvvise "bombe d'acqua" [9]. Un tetto verde in clima mediterraneo può trattenere oltre il 60% del volume di pioggia precipitata [10]. La capacità di accumulare acqua dipende dalle caratteristiche e tipologia dei materiali utilizzati per la stratigrafia, della vegetazione coltivata, dalla composizione e profondità del substrato, dai metodi di drenaggio e altro. Le essenze vegetali del pacchetto tetto verde comprendono numerose diverse specie di piante che definiscono differenti tipologie di tetto verde sotto il profilo della vegetazione e dei carichi statici: tetto verde estensivo, intensivo e semi-intensivo. La componente vegetale è ovviamente fondamentale in quanto le piante possono accentuare l'evapotraspirazione oltre che trattenere l'acqua in modi differenti: per esempio piante con ampie superfici radicali trattengono una maggiore quantità di acqua con vantaggi rispetto al deflusso dell'acqua.

Altri benefici noti e non meno importanti delle coperture verdi riguardano la tutela e la salvaguardia della biodiversità vegetale e animale; i tetti verdi, infatti, essendo spesso inaccessibili al pubblico, possono fornire un habitat indisturbato per uccelli, microorganismi e insetti e possono rappresentare un'alternativa per la sopravvivenza della flora e fauna indigena [11]. Inoltre, permettono l'attenuazione del rumore in ambito urbano e svolgono una funzione protettiva nei confronti dei materiali strutturali del tetto dell'edificio, limitandone l'esposizione al calore e alla radiazione ultravioletta, agenti dannosi in particolar modo per le membrane bituminose dei tetti tradizionali.

Il focus della ricerca prevista per la Linea di Attività L.A. 2.1 all'interno della Programmazione Triennale RdS 2019-2021 è mirato alla valutazione integrata dei parametri energetici ed ambientali delle strutture verdi (tetto, parete e serra bioclimatica verde). L'attività progettuale include una valutazione delle essenze vegetali caratterizzate da elevata efficienza di evapotraspirazione (ET) e indice di area fogliare (LAI). Ulteriori indagini saranno effettuate per misurare i valori di albedo delle specie vegetali presenti sul prototipo di tetto verde ENEA. I dati consentiranno di definire il contributo delle coperture vegetali alla riduzione dei consumi elettrici, alla mitigazione della trasmissione del calore all'interno dell'edificio, al contrasto del fenomeno "isola di calore" nelle città. Inoltre, verrà valutata l'efficienza del verde nel sequestro di alcuni dei maggiori inquinanti presenti nell'atmosfera circostante (valori elevati di CO₂ e VOC). Inoltre, sono state definite le risorse scientifiche (software e metodologie) per l'analisi delle proprietà termiche ottenute da telerilevamento su superfici verdi in aree urbane geolocalizzate. Gli *outputs* delle analisi energetiche ed ambientali saranno propedeutici all'elaborazione di linee guida per operatori, progettisti, imprese, e per integrare le certificazioni energetiche ed ambientali degli edifici verdi.

2 Parete verde

La letteratura scientifica sui benefici ambientali ed energetici delle pareti verdi sugli edifici è oggi abbastanza ampia. In aggiunta al raffrescamento degli ambienti interni che determina una riduzione dei consumi di energia soprattutto in estate, le pareti verdi hanno anche il vantaggio di ridurre la CO₂ dell'aria sequestrandola nella biomassa e nel substrato di coltivazione delle piante.

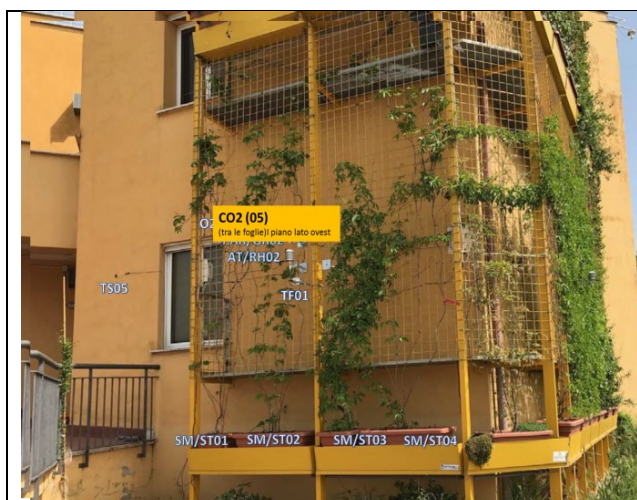
2.1 Valutazione della capacità di assorbimento della CO₂ indoor/outdoor: implementazione della sensoristica

Per valutare la capacità di assorbimento della CO₂ nel prototipo di parete verde ENEA, tenendo conto delle variabili microclimatiche legate alla posizione dell'edificio, alla ventilazione, alla temperatura, all'umidità e all'irraggiamento, è stato necessario acquistare un dispositivo specifico per la misura della concentrazione di CO₂ dell'aria. In particolare, è stato implementato un sistema di campionamento e misura di 10 punti (vale a dire 10 localizzazioni diverse), provvisto di analizzatore Licor830 e *datalogger*, che consente un'accuratezza di errore inferiore a 10 ppm.

I sensori sono stati disposti sia a livello della superficie vegetale esterna che nell'intercapedine tra coltre vegetale e parete dell'edificio. Più in particolare, i punti selezionati per la misura della concentrazione di CO₂ sono stati:

- Parete verde Sud-Ovest al 1° piano dell'edificio (1 sulla *canopy* esterna e 1 nell'intercapedine)
- Parete verde Sud-Ovest al 2° piano dell'edificio (1 sulla *canopy* esterna e 1 nell'intercapedine)
- Parete verde Sud-Est al 2° piano dell'edificio (1 sulla *canopy* esterna e 1 nell'intercapedine)
- Stanza adiacente alla parete verde Sud-Ovest al 1° piano (1 al centro del soffitto della stanza)
- Stanza adiacente alla parete verde Sud-Ovest al 2° piano (1 al centro del soffitto della stanza)
- Controlli sulle pareti spoglie prive di vegetazione (2 sensori)

È noto che la concentrazione di CO₂ sia dipendente dall'altezza a causa della stratigrafia dell'aria. Infatti, essendo la CO₂ il gas più pesante presente nell'aria (pesa circa 1,5 volte più dell'aria), tende a stratificare verso il basso, con possibilità di accumularsi in fosse o avvallamenti nel terreno. Per questo motivo è stata fatta molta attenzione a disporre tutti i sensori alla stessa altezza dal suolo ed anche al confronto degli effetti della parete verde a livello sia del 1° che del 2° piano dell'edificio.



a. Parete esposta a Sud-Ovest (SO), 1° piano: sensore CO₂ inserito tra le foglie delle piante



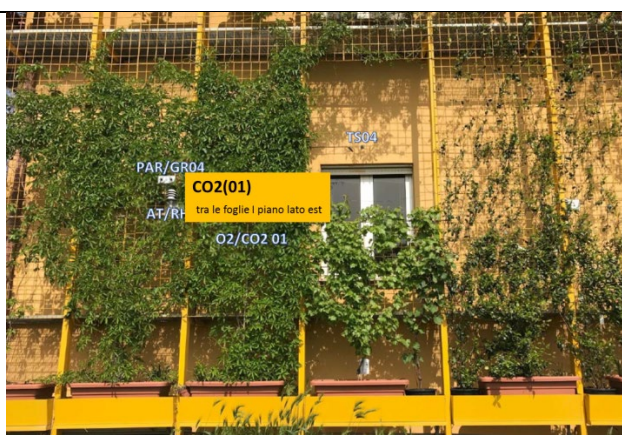
b. Intercapedine della parete esposta a Sud-Ovest (SO), 1° piano: sensore CO₂ in area equidistante tra la parete verde e la parete dell'edificio



c. Parete esposta a Sud-Ovest (SO), II° piano: sensore CO₂ inserito tra le foglie della parete verde



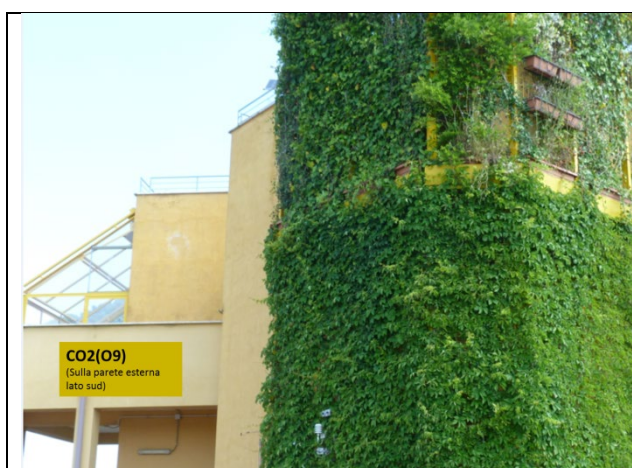
d. Intercapedine della parete esposta a Sud-Ovest (SO), II° piano: sensore CO₂ in area equidistante tra la parete verde e la parete dell'edificio



e. Parete esposta a Sud-Est (SE), 1° piano: sensore CO₂ inserito tra le foglie della parete verde



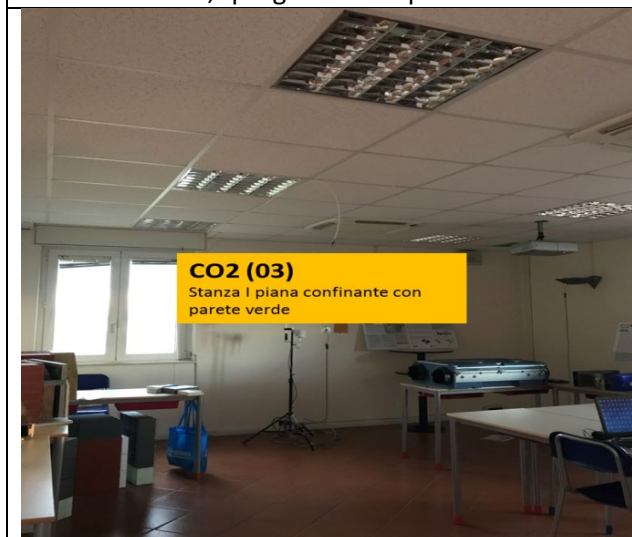
f. Intercapedine della parete esposta a Sud-Est (SE): 1° piano: sensore CO₂ in area equidistante tra la parete verde e la parete dell'edificio



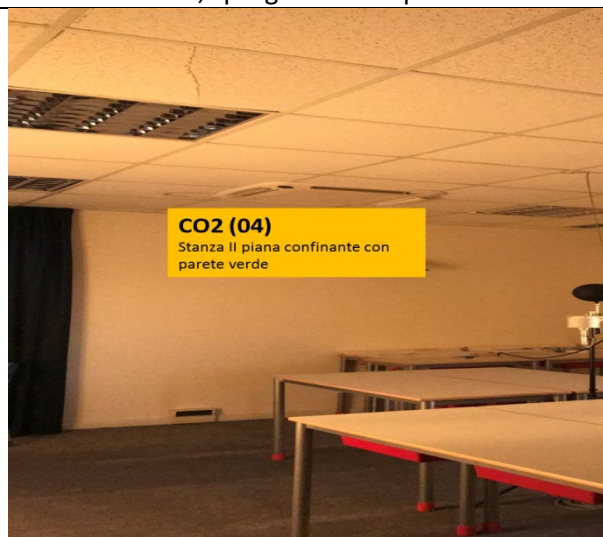
g. Parete esposta a Sud (S): punto CO₂ di controllo collocato in aria, sporgente dalla parete del balcone



h. Parete esposta a nord (N): punto CO₂ di controllo collocato in aria, sporgente dalla parete dell'edificio



i. Stanza I° piano: punto CO₂ collocato in alto al centro stanza



l. Stanza II° piano: punto CO₂ collocato in alto al centro stanza

Figura 1. Disposizione dei sensori per il rilevamento della CO₂. Come controllo negativo, cioè in assenza dell'effetto parete verde, un sensore è stato collocato sulla parete nuda a sud (S), a un'altezza intermedia tra i punti di misura inseriti nella parete verde al I° (a-b) e al II° piano (c-d); un altro sensore è stato posto sulla parete nuda a nord (N) (g-h). Ulteriori due punti di misura della CO₂ sono stati collocati all'interno delle stanze confinanti con le pareti verdi del I° e del II° piano dell'edificio (i-l).

2.1.1 Analisi delle variazioni della CO₂ per la validazione della sensoristica

Dalle **Figura 2** e **Figura 3** si possono dedurre alcune osservazioni:

- L'andamento della concentrazione di CO₂ non è costante ma varia fortemente da un giorno all'altro; inoltre, periodi in cui non sono riscontrabili variazioni (ad es. tra il 28 e il 30 dicembre) si alternano a periodi di variazioni repentine (ad es. fra il 24 e il 27 dicembre).
- Le tracce dei sensori posti sulle pareti coperte da vegetazione e sulle pareti nude risultano molto simili fra loro, indipendentemente dal loro posizionamento, con l'eccezione di quella del primo sensore (traccia blu nella **Figura 2**) che risulta sistematicamente inferiore alle altre.
- Le tracce dei sensori posti negli ambienti interni (**Figura 3**) seguono un andamento simile a quelle dei sensori esterni, ma con variazioni più smussate sia in intensità che nella forma. In considerazione del fatto che le stanze durante questo periodo di misura sono rimaste chiuse ed inutilizzate, la concentrazione di CO₂ non presenta picchi elevati.
- Come risulta dalla **Figura 3**, la stanza al 1° piano (tracciato blu) mostra concentrazioni sistematicamente più elevate rispetto alla stanza del 2° piano, come ci si aspettava in base alle conoscenze note sulla stratigrafia della CO₂.

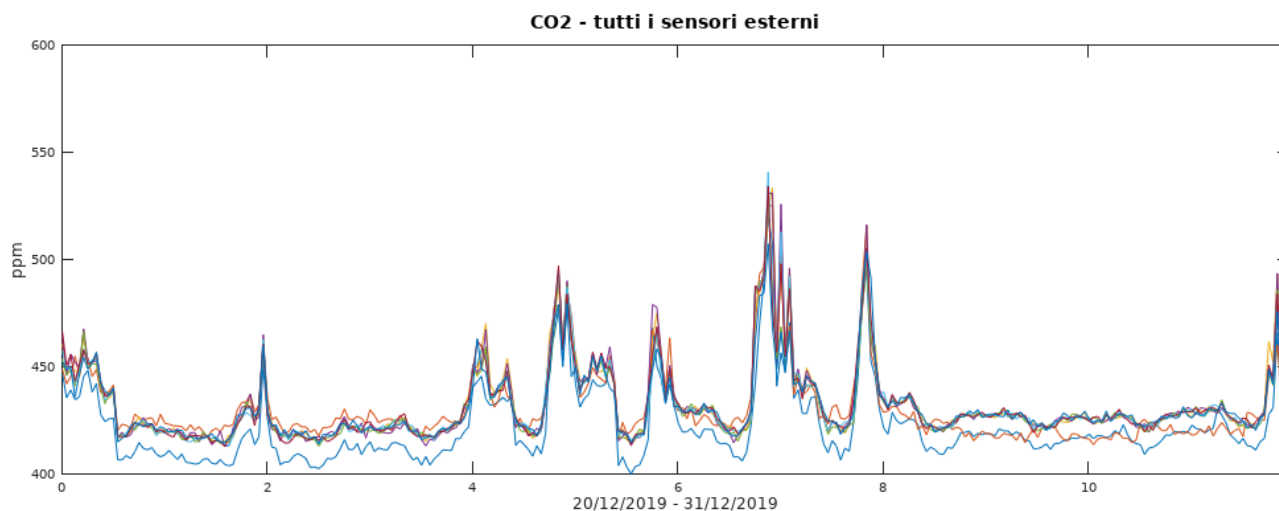


Figura 2: Tracciato relativo a tutti i punti di rilevamento della CO₂ nella parete verde e nelle pareti di controllo nel periodo 20-31 dicembre 2019.

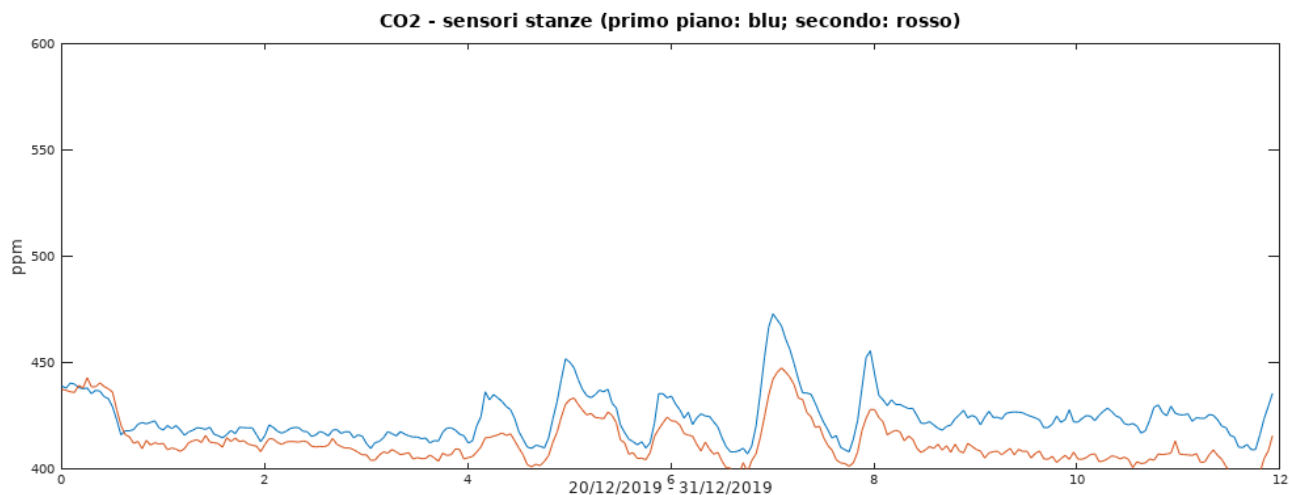


Figura 3. Tracciato relativo ai punti di rilevamento della CO₂ localizzati negli ambienti interni (*indoor*) confinanti con la parete verde nel periodo 20-31 dicembre 2019.

2.1.2 Variazione della concentrazione di CO₂ in relazione alla velocità del vento e ai movimenti d'aria

È stato inoltre riscontrato che la velocità del vento (misurata sul tetto dell'edificio) e la concentrazione di CO₂ risultano in controfase, vale a dire che la concentrazione di CO₂ risulta massima quando cala il vento e viceversa (**Figura 4**). L'effetto del vento sembrerebbe quello di allontanare la CO₂ che si accumula intorno alle piante.

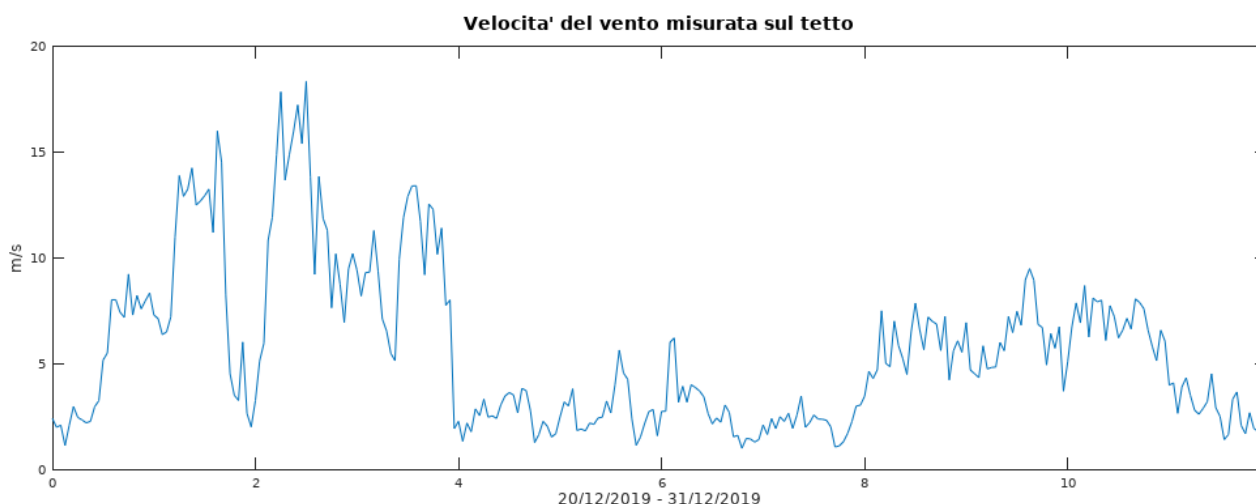


Figura 4. Velocità del vento nel periodo 20-31 dicembre 2019.

Questi risultati sono solo preliminari. Durante l'anno 2020 verranno effettuate delle analisi più dettagliate, anche considerando periodi più lunghi ed in rapporto allo sviluppo vegetativo delle piante e alle condizioni microclimatiche simultaneamente monitorate.

L'analisi delle variazioni di concentrazione di CO₂ richiede il monitoraggio dei movimenti d'aria che si verificano in corrispondenza delle pareti verdi. Nella **Figura 5** sono riportate le intensità rilevate dagli anemometri installati al primo e al secondo piano, oltre che sul tetto dell'edificio. La vicinanza delle pareti smorza l'intensità del vento rispetto a quella registrata dove non ci sono impedimenti (traccia blu - sensore posto sul tetto). Inoltre, l'intensità dei flussi d'aria risulta più marcata in corrispondenza della parete Sud-Est (tracce blu e gialla) rispetto alla parete Sud-Ovest (viola e verde). Come prevedibile, i movimenti d'aria risultano più intensi al secondo piano rispetto al primo.

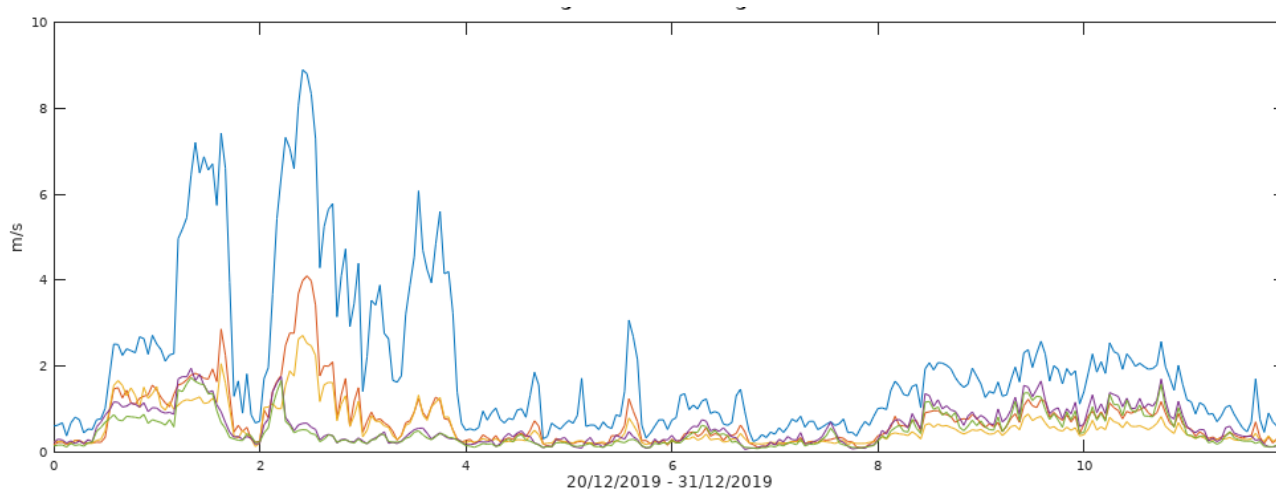


Figura 5. Intensità del vento rilevata sulle pareti verdi dagli anemometri.

Inoltre, a complemento dei sensori inseriti precedentemente sull'edificio [12] [13], sulla parete verde al II° piano sono stati aggiunti ulteriori dispositivi, in particolare:

- n° 1 sensore di radiazione solare globale (PAR);
- n° 1 sensore di temperatura e umidità dell'aria in schermo (termoigrometro).

2.2 Rilevamento dati termici anno 2019 sulla parete verde di Sud-Est

Un'analisi preliminare dei dati termici rilevati a livello della parete Sud-Est è stata condotta per i mesi di febbraio e marzo (stagione invernale) e da luglio a settembre (stagione estiva), al fine di rilevare eventuali differenze di temperatura tra la parete dell'edificio schermata dalla coltre vegetale e la parete nuda. L'analisi di seguito riportata riguarda i dati relativi al monitoraggio della temperatura e di altri parametri microclimatici misurati a livello parietale nell'arco delle 24 della prima giornata di ciascun mese considerato. In particolare, per la parete schermata, sono state prese in considerazione porzioni di parete coperte da due differenti specie vegetali: la sempreverde *Trachelospermum jasminoides* (Lindl.) Lem e la caducifolia *Partenocissus quinquefolia* L.

Monitoraggio periodo invernale

In **Figura 6** si evidenzia una riduzione della temperatura superficiale della parete coperta dalla sempreverde *Trachelospermum jasminoides*, il 1° febbraio 2019. Non si evidenziano differenze significative di temperatura superficiale tra la parete schermata e quella non schermata. Diversamente, la temperatura dell'aria nell'intercapedine, nelle ore diurne, rimane superiore (di qualche grado) alle temperature superficiali delle pareti dell'edificio.

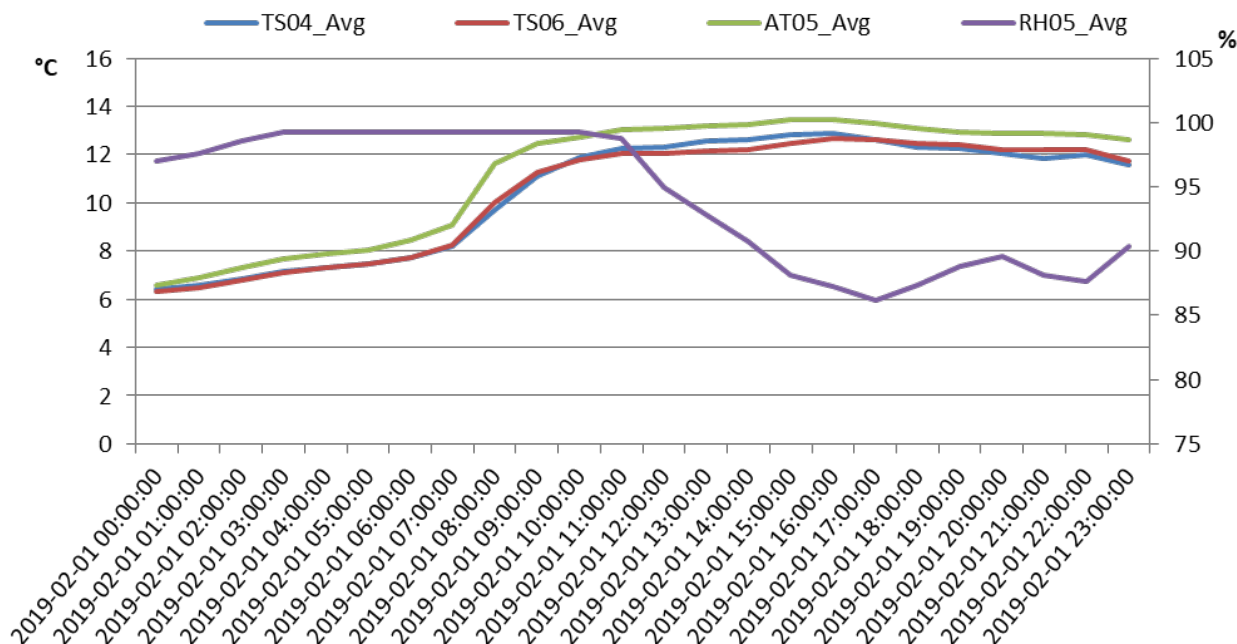


Figura 6. Analisi dei dati microclimatici del 1° febbraio 2019. Valori medi (Avg) di temperature superficiali (TS) della parete schermata da *Trachelospermum jasminoides* (TS06) e di quella non schermata (TS04), temperatura (AT05) e umidità dell'aria (RH05) nell'intercapedine.

In **Figura 7** si evidenzia una riduzione della temperatura superficiale della parete coperta dalla caducifoglie *Partenocissus quinquefolia*, il 1° febbraio 2019. Anche in assenza di foglie si nota un leggero effetto schermante da parte della pianta. Il *Partenocissus quinquefolia* è una pianta rampicante di grandi dimensioni e quindi il fusto e i rami esercitano comunque una leggera schermatura alla radiazione solare.

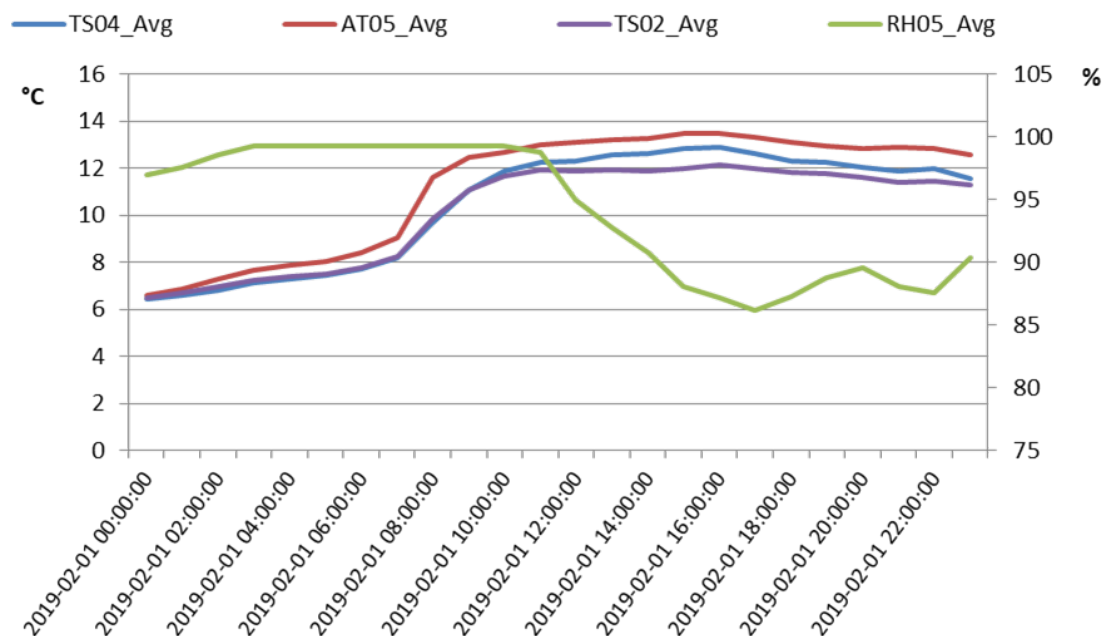


Figura 7. Analisi dei dati microclimatici del 1° febbraio 2019. Valori medi (Avg) di temperature superficiali (TS) della parete schermata da *Partenocissus quinquefolia* (TS02) e di quella non schermata (TS04), temperatura (AT05) e umidità dell'aria (RH05) nell'intercapedine.

Nel mese di marzo 2019, l'aumento della radiazione solare e della temperatura dell'aria determina una differenza sensibile della temperatura superficiale tra la parete schermata e non schermata dal *Trachelospermum jasminoides*: alle ore 12 la differenza è superiore ai 5°C (Figura 8).

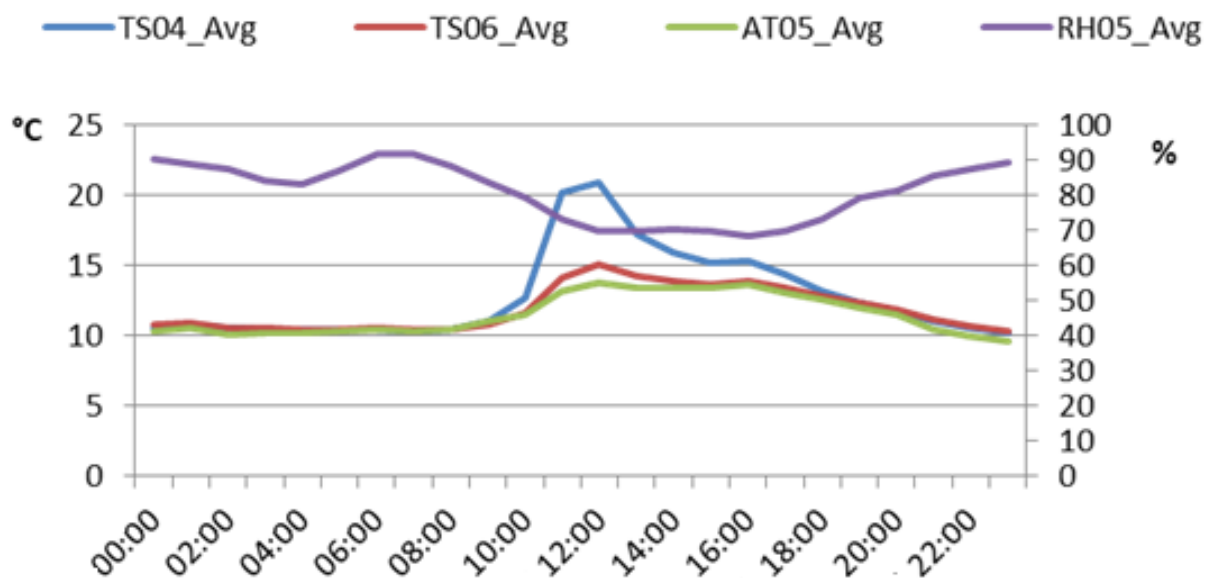


Figura 8. Analisi dei dati microclimatici del 1° marzo 2019. Valori medi (Avg) di temperature superficiali (TS) della parete schermata da *Trachelospermum jasminoides* (TS06) e di quella non schermata (TS04), temperatura (AT05) e umidità dell'aria (RH05) nell'intercapedine.

In **Figura 9** sono state evidenziate le differenze di temperatura dovute alle due diverse specie di piante. Le differenze di temperatura tra parete coperta da vegetazione e parete nuda sono maggiori quando è presente la specie sempreverde *Trachelospermum jasminoides*; tuttavia, la schermatura effettuata dalla pianta di *Partenocissus quinquefolia*, di circa 2 °C alle ore 12:00, conferma l'effetto schermante della pianta anche in assenza delle foglie. Alla stessa ora, la differenza di temperatura superficiale tra la parete schermata dal *Trachelospermum jasminoides* e la parete nuda è superiore ai 5° C.

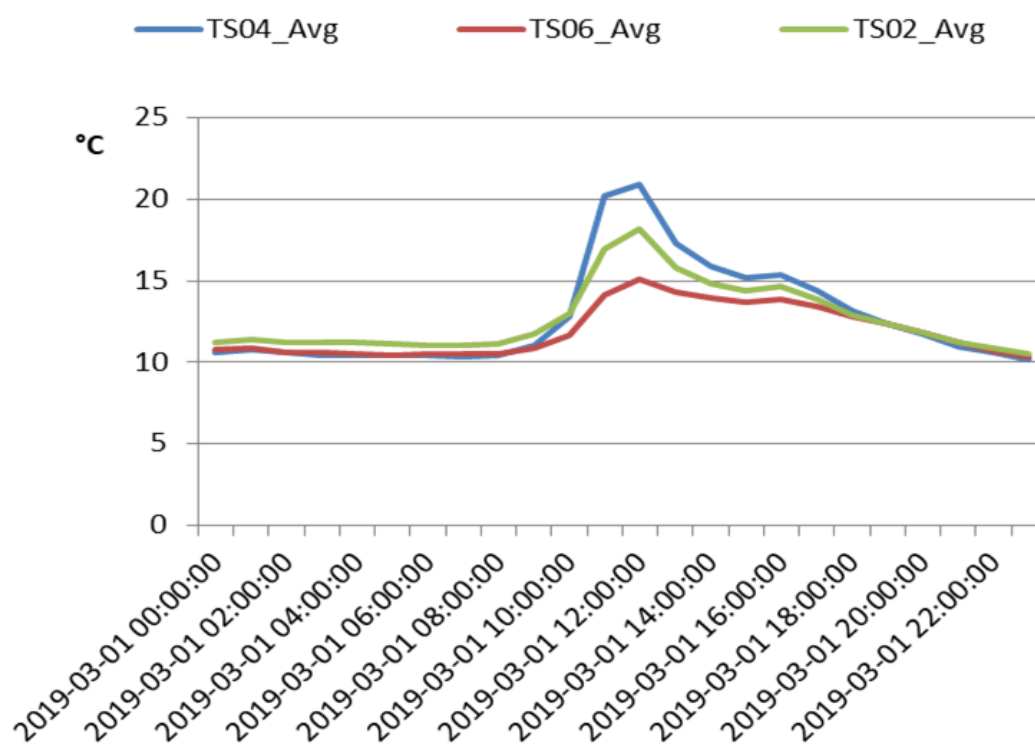


Figura 9. Analisi delle temperature superficiali del 1° marzo 2019. Valori medi (Avg) di temperature superficiali (TS) della parete schermata da *Trachlosperrum jasminoides* (TS06), della parete schermata da *Partenocissus quinquefolia* (TS02) e della parete non schermata (TS04).

In **Figura 10** è mostrata la riduzione della radiazione solare globale incidente sulla parete dell'edificio dovuta alla schermatura della vegetazione. La radiazione solare viene rilevata su piano verticale, rispettivamente sull'area frontale della vegetazione e sull'area posteriore della coltre vegetale. In particolare, alle ore 11:00, si rileva una riduzione del valore della radiazione di circa 160 W/mq. Questa differenza è di molto inferiore a quella misurata nel mese di luglio (**Figura 13**) quando la schermatura da parte della pianta *Partenocissus quinquefolia* è in pieno rigoglio vegetativo.

Radiazione globale parete schermata e non schermata 1 marzo 2019 ore 00:00-23:00

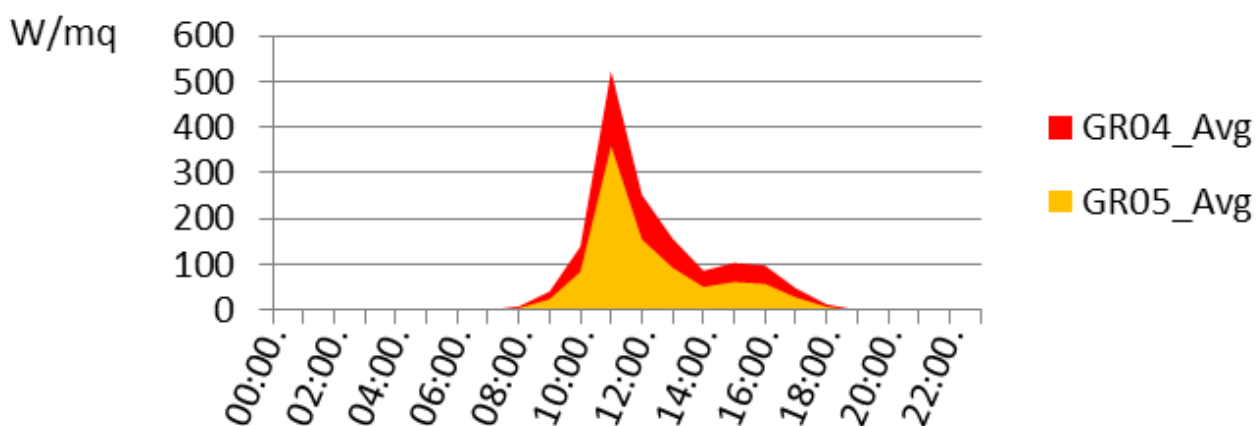


Figura 10. Variazione della radiazione solare globale incidente (GR04) e sull'area posteriore (GR05) della coltre vegetale.

Monitoraggio periodo estivo

Principalmente, nei mesi estivi è stata evidenziata una riduzione della temperatura superficiale della parete coperta dalla coltre vegetale su un arco temporale di 24 ore per mese. È stata confrontata la temperatura della parete coperta dalla specie sempreverde *Trachospermum jasminoides* (Lindl.) Lem con quella della parete coperta dalla specie caducifoglie *Partenocissus quinquefolia* L.

In **Figura 11** si evidenziano le relazioni tra la temperatura (AT) e l'umidità dell'aria (RH) rilevate nell'intercapedine (*gap* tra la facciata dell'edificio e la copertura vegetale, che nel prototipo in studio presentava una distanza iniziale di 60 cm, che si è venuta riducendo con l'accrescimento della coltre fogliare) e le temperature superficiali (TS) rilevate tra la parete dell'edificio non schermata e quella schermata dal *Trachospermum jasminoides*. È stato osservato che, nelle ore notturne, la temperatura all'interno dell'intercapedine rimane costante e aumenta a partire dalle ore 6:00. L'umidità dell'aria nell'intercapedine inizia a diminuire intorno alle ore 7:00, per aumentare successivamente intorno alle ore 20:00. Le temperature superficiali notturne rilevate sulle pareti schermata e non schermata non presentano differenze significative; tuttavia, a partire dalle ore 5:00, la temperatura superficiale della parete non schermata risulta più elevata e, nelle ore di maggiore incidenza della radiazione solare (verso le ore 11:00), raggiunge una differenza di circa 6 °C.

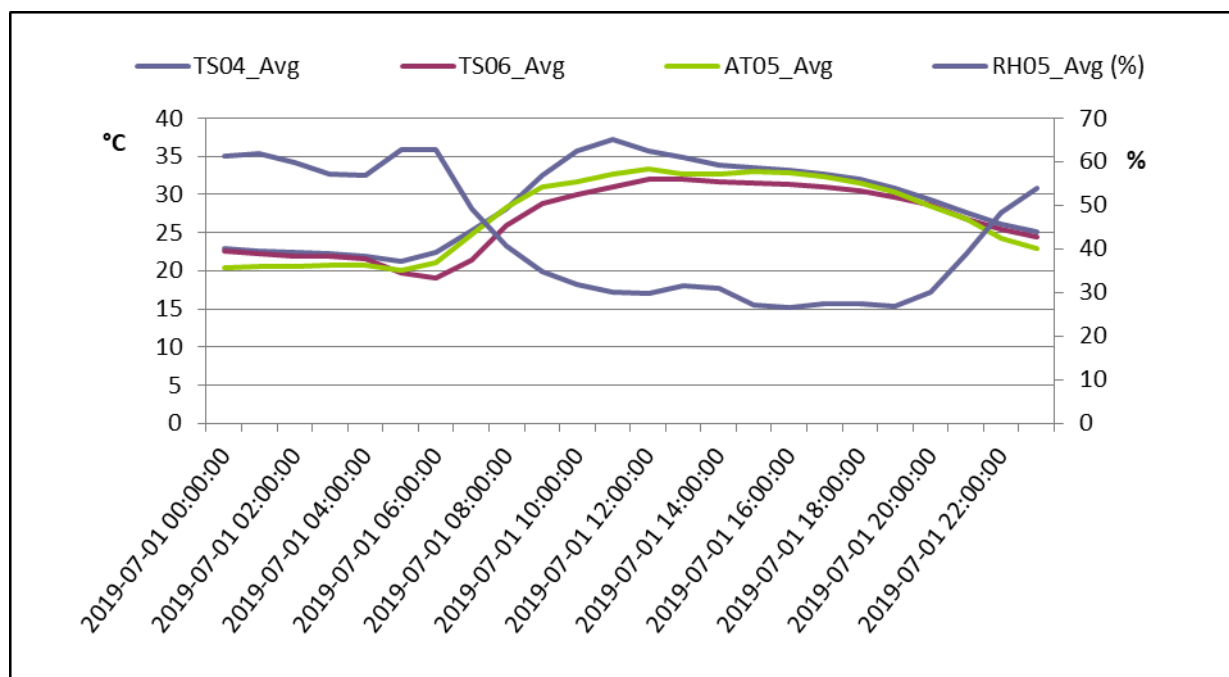


Figura 11. Analisi dei dati microclimatici del 1° luglio 2019. Valori medi (Avg) di temperature superficiali (TS) della parete schermata da *Trachospermum jasminoides* (TS06) e di quella non schermata (TS04), temperatura (AT05) e umidità dell'aria (RH05) nell'intercapedine.

La **Figura 12** mostra gli andamenti della temperatura superficiale (TS) a livello delle pareti schermate dalle due differenti specie di piante, rispettivamente *Trachospermum jasminoides* e *Partenocissus quinquefolia*, e della parete priva di copertura vegetale. Alle ore 11:00, la differenza di temperatura tra la parete schermata dal *Trachospermum jasminoides* e quella non schermata è di circa 6 °C. Questa differenza è maggiore rispetto alla differenza di temperatura tra la parete schermata dal *Partenocissus quinquefolia* e quella non schermata che è di circa 3 °C.

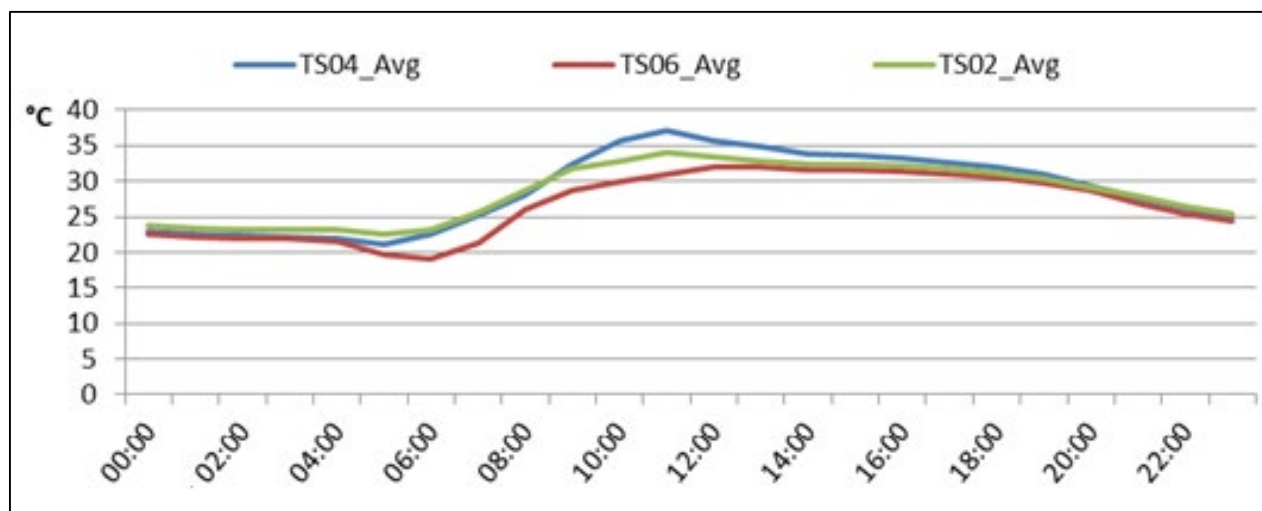


Figura 12. Analisi delle temperature superficiali del 1° luglio 2019. Valori medi (Avg) di temperature superficiali (TS) della parete schermata da *Trachospermum jasminoides* (TS06), della parete schermata da *Partenocissus quinquefolia* (TS02) e della parete non schermata (TS04).

In **Figura 13** è mostrata la riduzione della radiazione solare globale incidente sulla parete dell'edificio dovuta alla schermatura della vegetazione. La radiazione solare viene rilevata su piano verticale, rispettivamente sull'area frontale della vegetazione e sull'area posteriore della coltre vegetale. In particolare, alle ore 11:00, si rileva una forte riduzione del valore della radiazione (> 500 W/mq).

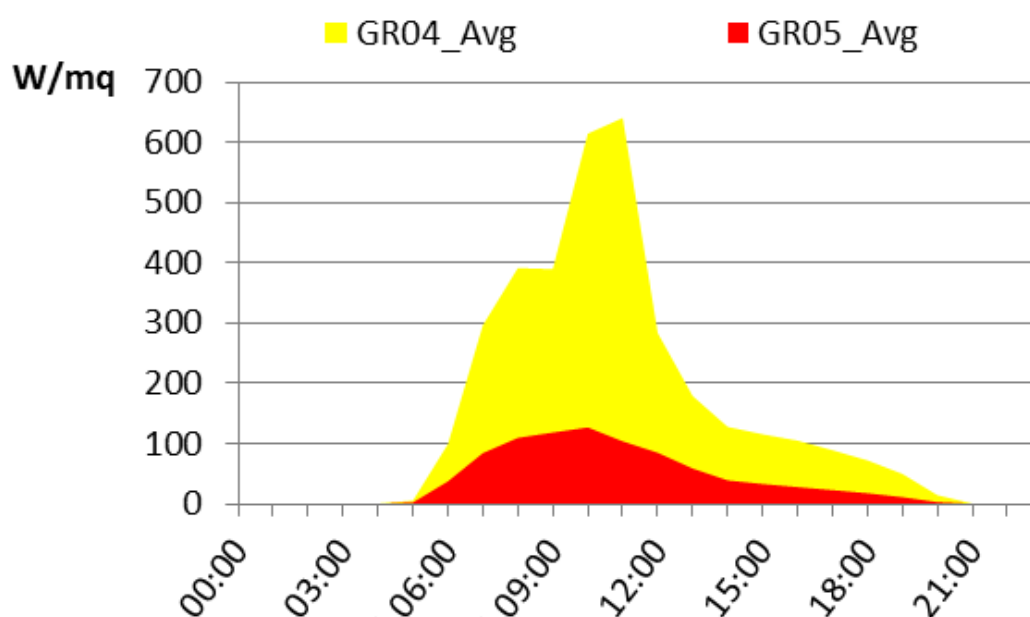


Figura 13. Variazione della radiazione solare globale incidente (GRO4) e sull'area posteriore (GR05) della coltre vegetale.

La **Figura 14** mostra gli andamenti della temperatura superficiale (TS) a livello delle pareti schermate dalle due differenti specie di piante, rispettivamente *Trachospermum jasminoides* e *Partenocissus quinquefolia* e della parete priva di copertura vegetale il 1° agosto 2019. Si evidenzia che il *Trachospermum jasminoides*, ad agosto, esercita un effetto schermante superiore a quello esercitato dal *Partenocissus quinquefolia*: alle ore 11 la differenza di temperatura rispetto alla facciata nuda è di 10 °C nel caso del *Trachospermum jasminoides* e di circa 7°C nel caso del *Partenocissus quinquefolia*. Molto probabilmente tali differenze sono dovute ad una maggiore densità di copertura (vigoria fogliare) del *Trachospermum jasminoides*. A questo proposito, negli anni successivi è previsto il monitoraggio del LAI (indice di area fogliare) e la misura dello SPAD (indice della capacità fotosintetica della *canopy* vegetale), parametri che verranno messi in relazione con i valori di temperatura superficiale, umidità, radiazione solare globale e visibile (PAR).

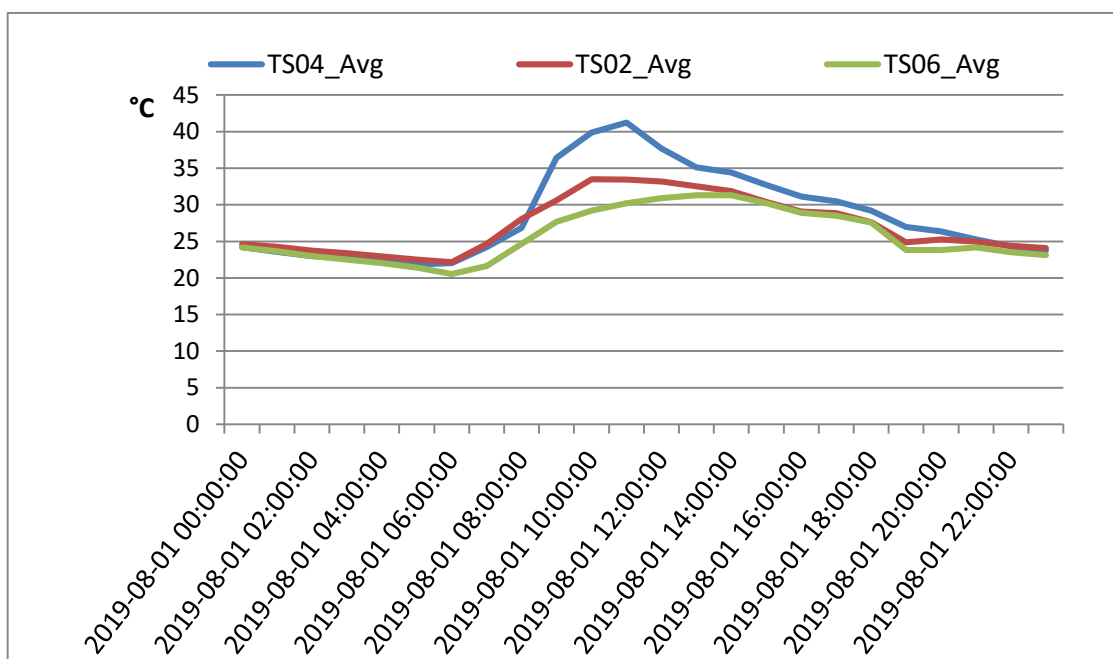


Figura 14. Analisi delle temperature superficiali del 1° agosto 2019. Valori medi (Avg) di temperature superficiali (TS) della parete schermata da *Trachospermum jasminoides* (TS06), della parete schermata da *Partenocissus quinquefolia* (TS02) e della parete non schermata (TS04).

La **Figura 15** mostra gli andamenti dei valori di temperatura (AT) e umidità dell'aria (RH) a livello dell'intercapedine e sulla superficie frontale della vegetazione al 1° agosto 2019. Durante le ore più calde, l'umidità dell'aria nell'intercapedine e a livello parete verde esterna non mostrano particolari differenze; mentre, nelle ore serali e notturne, l'umidità dell'aria sulla superficie frontale della parete verde risulta leggermente più elevata rispetto all'intercapedine. La temperatura nell'intercapedine risulta lievemente più elevata dalle ore 12:00 alle 16:00 circa, con una differenza massima di 2 °C alle ore 14:00.

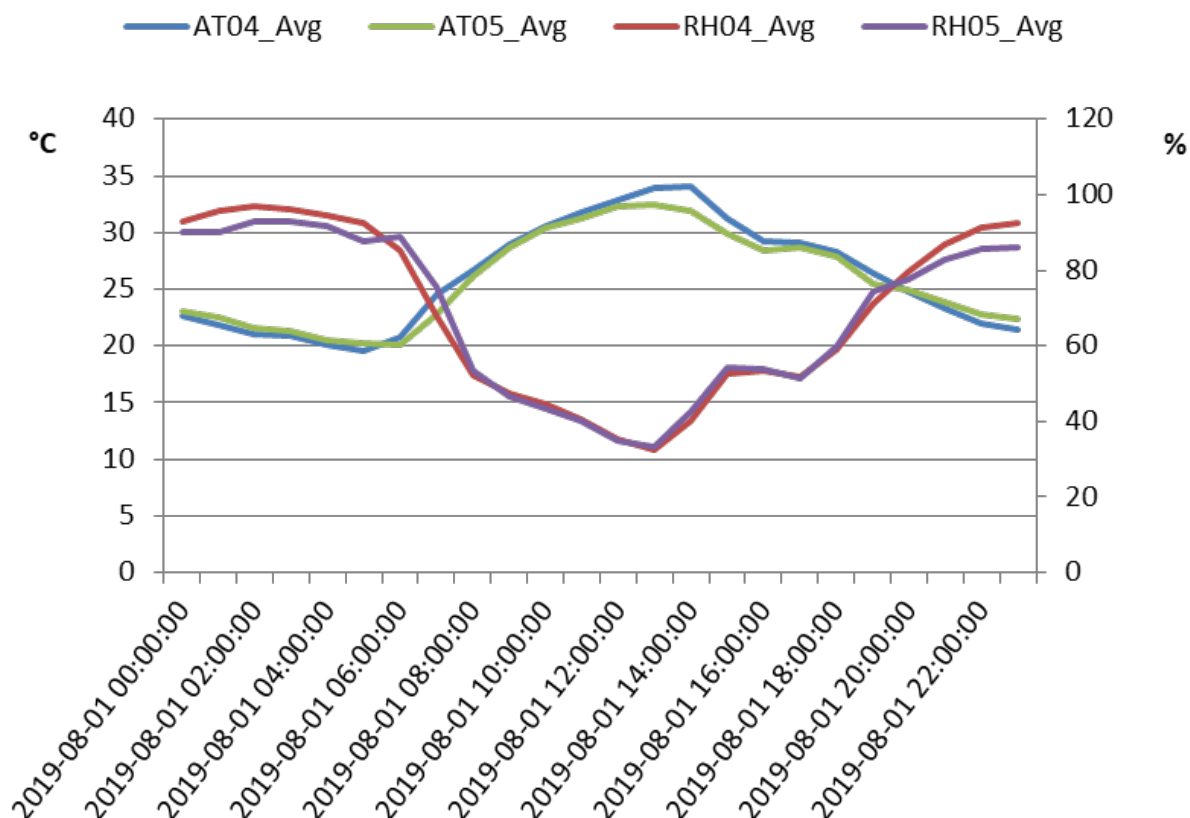


Figura 15. Analisi dei dati microclimatici del 1° agosto 2019. Valori medi (Avg) di temperature superficiali (TS) e umidità dell'aria (RH). Temperatura (AT04) e umidità (RH04) dell'aria a livello della superficie fogliare esterna; temperatura (AT05) e umidità (RH05) dell'aria a livello dell'intercapedine.

In **Figura 16** sono mostrate le temperature superficiali rilevate tra le pareti schermate dalle specie vegetali e quella non schermata. La differenza, alle ore 11:00, è di 10 °C per la parete schermata dal *Trachelospermum* e di circa 8 °C per quella schermata dal *Partnocissus*. Anche nel mese di settembre il *Trachelospermum* mostra un maggiore potere schermante rispetto al *Partenocissus*. Si sottolinea che l'effetto di schermatura dipende, comunque, da numerose variabili della vegetazione, tra cui simmetria, forma, spessore e densità fogliare, tipo di ramificazione, ecc.

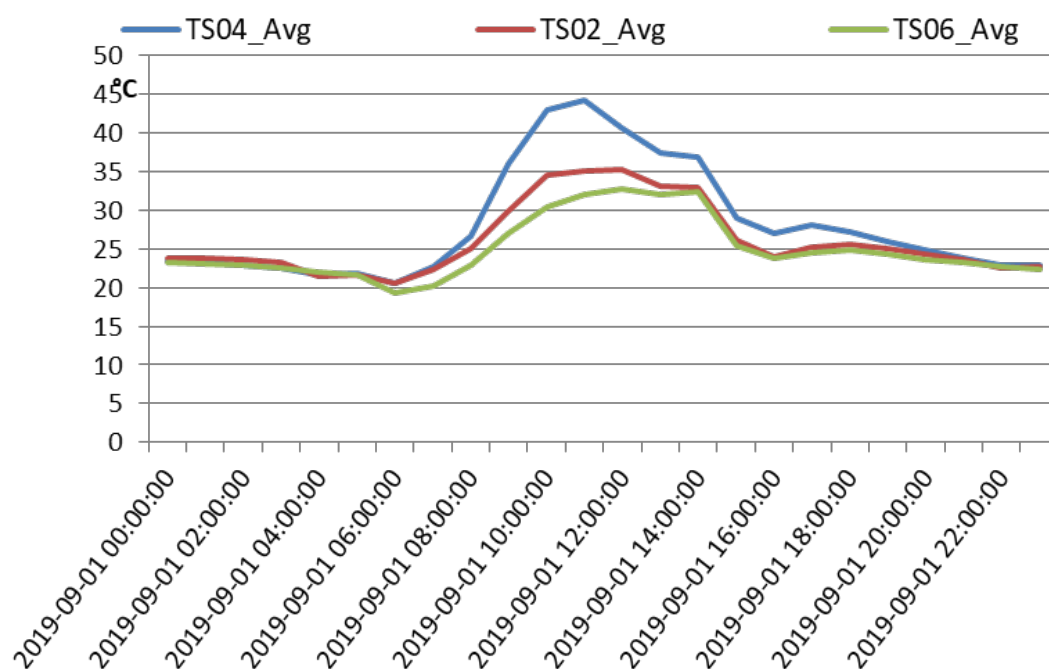


Figura 16. Analisi delle temperature superficiali del 1° settembre 2019. Valori medi (Avg) di temperature superficiali (TS) della parete schermata da *Trachlospermum jasminoides* (TS06), della parete schermata da *Partenocissus quinquefolia* (TS02) e della parete non schermata (TS04).

La **Figura 17** mostra gli andamenti dei valori di temperatura (AT) e umidità dell'aria (RH) a livello dell'intercapedine e sulla superficie frontale della vegetazione al 1° settembre 2019. Gli andamenti non differiscono da quelli rilevati il 1° agosto; ad eccezione di una lieve riduzione della temperatura rilevata all'esterno della copertura verde e, contemporaneamente, un innalzamento dell'umidità all'interno dell'intercapedine.

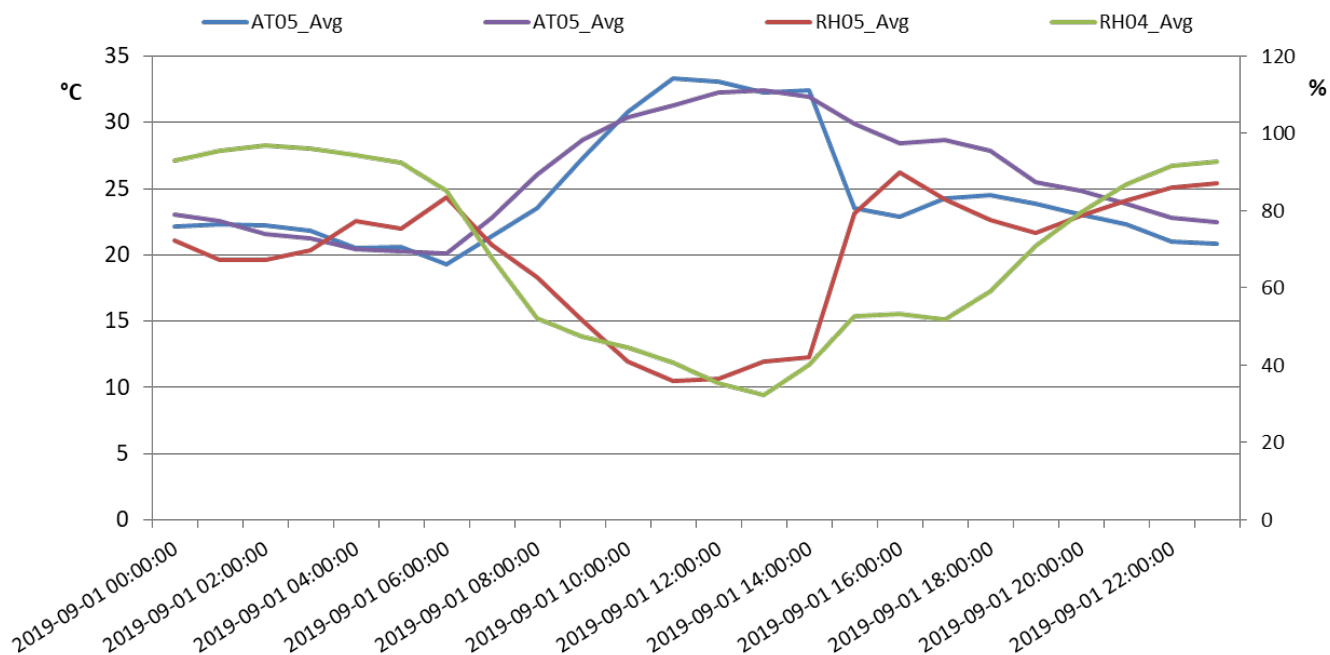


Figura 17. Analisi dei dati microclimatici del 1° settembre 2019. Valori medi (Avg) di temperature superficiali (TS) e umidità dell'aria (RH). Temperatura (AT04) e umidità (RH04) dell'aria a livello della superficie fogliare esterna; temperatura (AT05) e umidità (RH05) dell'aria a livello dell'intercapedine.

2.3 Composti organici volatili (COV)

I Composti Organici Volatili (COV) costituiscono una classe rilevante di inquinanti dell'aria *outdoor/indoor* con caratteristiche intrinseche molto differenti fra una sostanza e l'altra e una capacità d'impatto che va dal disagio sensoriale a gravi effetti sullo stato di salute; fattori decisivi sono la concentrazione e la persistenza ambientale, la tossicità e la soglia olfattiva. Varie sono le fonti d'inquinamento, per cui i COV possono essere di origine biogenica se sono emessi naturalmente dalle piante (es. i terpeni) o antropogenica se derivano da attività umane (es. solventi, vernici). Un particolare interesse va dedicato all'inquinamento *indoor*, considerato che la popolazione trascorre la maggior parte del proprio tempo in ambienti confinati, e dove è più facile che siano presenti contemporaneamente più agenti inquinanti (composti organici e inorganici, radiazioni ionizzanti e non ionizzanti, microrganismi, muffe, acari). Il monitoraggio di tali sostanze consente di acquisire informazioni utili sulla qualità dell'aria e sulle misure da attuare per ridurre il contatto.

2.3.1 Normative sui COV

Negli anni sono uscite diverse normative, sia europee sia italiane, in merito alla riduzione dell'emissione dei COV e al loro monitoraggio. Tali direttive definiscono i livelli accettabili in atmosfera dei COV e di altri inquinanti e stabiliscono i metodi di riferimento per la misura degli stessi, inclusi parametri utili per il campionamento. Di seguito, le normative di maggior rilievo.

- La **Direttiva 2004/42/CE** (<https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/d51a8ae6-37ac-450a-8f33-48aae8cf3350/language-it>) relativa alla "Limitazione delle emissioni di composti organici volatili dovute all'uso di solventi organici in talune pitture e vernici e in taluni prodotti per carrozzeria", a cui è seguita l'attuazione italiana con il decreto legislativo n° 161 del 2006 e successive modifiche.
- Il **D.Lgs n° 152/2006** relativo alle "Norme in materia ambientale", conosciuto anche come "Testo Unico dell'Ambiente", stabilisce norme in materia di tutela del suolo e delle acque, gestione dei rifiuti, riduzione dell'inquinamento atmosferico, valutazione dell'impatto ambientale e risarcimento dei danni ambientali. Il decreto ha subito numerose modifiche negli anni e le ultime sono state introdotte dal decreto legislativo n. 21 del 2018.
- La **Direttiva 2010/75/CE** (<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/?uri=celex%3A32010L0075>) relativa alle "emissioni industriali (prevenzione e riduzione integrate dell'inquinamento)", recepita dall'Italia attraverso il decreto legislativo n° 46/2014, stabilisce norme volte ad evitare, o quanto meno ridurre, le emissioni delle attività industriali nell'aria, nell'acqua e nel terreno e la produzione di rifiuti, allo scopo di proteggere l'ambiente.
- La **Direttiva 2016/2284/CE** (https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/?uri=uriserv:OJ.L_.2016.344.01.0001.01.ITA), che abroga la direttiva 2001/81/CE, relativa alla "riduzione delle emissioni nazionali di determinati inquinanti atmosferici", recepita dall'Italia con il decreto legislativo n° 81 del 2018. Questa normativa europea stabilisce la riduzione delle emissioni atmosferiche antropogeniche di biossido di zolfo (SO₂), ossidi di azoto (NO_x), composti organici volatili non metanici (COVNM), ammoniaca (NH₃) e particolato fine (PM_{2,5}) e impone l'elaborazione e attuazione di programmi nazionali di controllo e monitoraggio dell'inquinamento atmosferico. Fino al 31 dicembre 2019 sarà possibile applicare i limiti nazionali di emissione previsti dal precedente D.Lgs n. 171/2004 che prevedeva il limite di 1159 chilotonnellate annue di COV. L'attuale decreto italiano fissa invece la riduzione delle emissioni di COVNM rispetto al 2005 del 35% dal 2020 al 2029 e del 46% a partire dal 2030.

2.3.2 Attività di monitoraggio dei COV presenti nell'aria

L'attività di monitoraggio che proponiamo si pone l'obiettivo di verificare una serie d'ipotesi, in particolare:

1. una coltre vegetale disposta verticalmente è in grado di ridurre la quantità di COV presenti nell'aria *outdoor* in prossimità della parete verde (distanza circa 1 m);
2. le diverse specie vegetali e la densità di copertura della parete possono influire in modo differente e significativo sulla riduzione della concentrazione delle sostanze volatili;
3. una coltre vegetale disposta verticalmente è in grado di ridurre la quantità di COV presenti all'interno di uno spazio confinato (*indoor*) adiacente, oltre che nell'aria *outdoor*.

L'attività proposta su questo tema per il biennio 2020-21 prevede un monitoraggio a lungo termine in posizioni rappresentative del sito scelto, collezionando i campioni d'aria da analizzare sia a livello delle coperture verdi dell'edificio sia a livello delle corrispondenti superfici "nude". I luoghi di campionamento saranno selezionati con particolare attenzione per evitare che un luogo poco rappresentativo dell'ambiente *target* renda improduttiva l'attività di monitoraggio.

Sulla base della ricerca bibliografica effettuata, degli obiettivi e dei fondi disponibili per quest'attività, abbiamo previsto che il monitoraggio verrà effettuato utilizzando campionatori passivi, che non prevedono l'utilizzo di un sistema di pompaggio dell'aria. In particolare, sarà utilizzato un campionario denominato Radiello (**Figura 18**) adatto per il rilevamento di bassi livelli di concentrazione, che abbiamo appurato essere affidabile, versatile ed economico. Si tratta di un sistema a simmetria radiale al cui interno è inserita una cartuccia adsorbente specifica per il rilevamento dell'inquinante bersaglio. Il corpo diffusivo contenente la cartuccia (costituito da polycarbonato e polietilene microporoso bianco) è fissato ad una piastra di supporto in polycarbonato ed esposto all'aria. Tale sistema consente di adsorbire in più punti del sito oggetto di studio, gli inquinanti target.

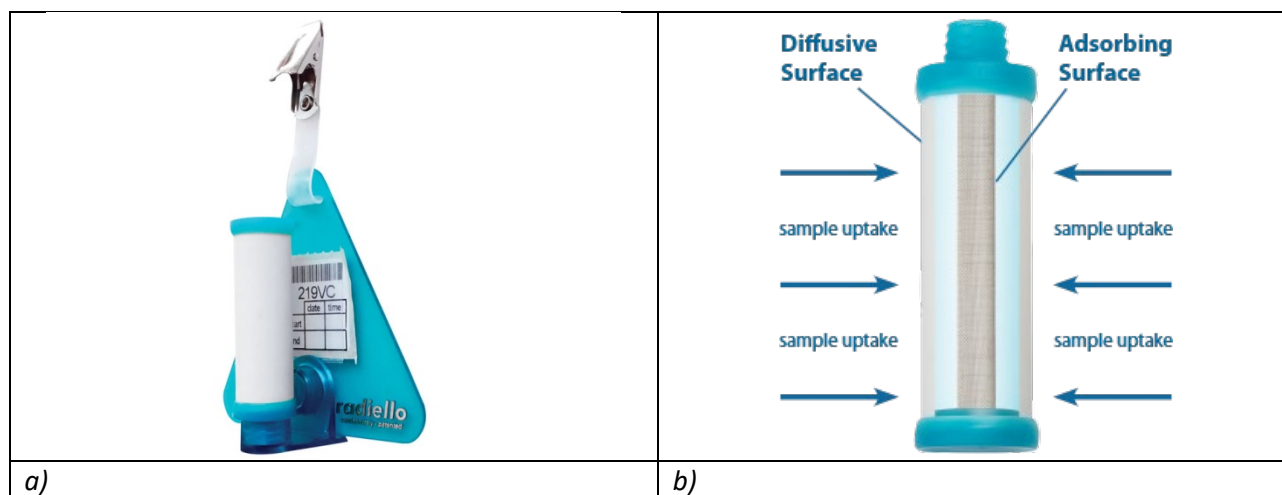


Figura 18. (a) Campionatore di aria a diffusione passiva Radiello®. Questo dispositivo è costituito da una cartuccia adsorbente (che costituirà il campione da analizzare in laboratorio) che deve essere inserita all'interno di un corpo di diffusione chiuso e supportato da un piatto. (b) Sezione di campionario che mostra la superficie diffusiva e la superficie assorbente, entrambe cilindriche. Il design radiale si traduce in una maggiore velocità di assorbimento.

Il campionamento sarà effettuato in primavera ad una temperatura di circa 25 °C, questo è importante per la riproducibilità dei dati in quanto la temperatura incide sulla volatilità e l'adsorbimento delle sostanze. Durante l'esposizione, i campionatori saranno appesi all'interno di un riparo, per proteggerli da eventi meteorologici, a circa 2,5 m di altezza dal suolo.

Alla fine del campionamento i COV saranno desorbiti dal supporto e analizzati in un sistema gascromatografico dotato di rivelatore a ionizzazione di fiamma (*flameionization detector*, FID) o a fotoionizzazione (*photoionization detector*, PID) per la quantificazione della loro concentrazione delle sostanze che si vogliono rilevare. L'analisi quantitativa sarà fatta da un laboratorio analitico utilizzando un contratto di servizio. Al momento è stato contattato l'Istituto Clinico Scientifico (ICS) Maugeri, una società certificata secondo la UNI EN ISO 9001:2015, con sede a Pavia. Avendo tale società brevettato il sistema Radiello®, attraverso di loro potremmo sia acquistare i materiali consumabili sia effettuare le analisi dei campioni.

In particolare, tra i vari inquinanti è stato deciso di monitorare gli idrocarburi aromatici volatili, benzene, toluene, etilbenzene e xilene (BTEX). Questi COV si trovano nei prodotti derivati dal petrolio come la benzina. Sono composti tossici e precursori dello smog fotochimico. Inoltre, è ormai noto che toluene, etilbenzene e xilene hanno effetti negativi sul sistema nervoso centrale. L'Edificio ENEA può essere visto come sito "*background*", trovandosi in un'area sufficientemente aperta e ventilata e non in diretta prossimità delle sorgenti locali d'emissione, rispetto a un sito "*hot spot*" individuato in area urbana. Pertanto, la nostra analisi sarà fatta sia sul prototipo di parete verde ENEA che su altre strutture verticali verdi, opportunamente selezionate, localizzate in aree diversamente soggette all'inquinamento ambientale da BTEX. Tale analisi comparativa su 3-4 installazioni verdi differenti, ci consentirà anche di ottenere informazioni sulle essenze vegetali più adatte alla mitigazione di tali COV.

Lo schema sperimentale definito per il campionamento è riportato di seguito:

1. Rispetto all'ipotesi 1 Per la parete verde ENEA, sia per il campionamento a livello della "*canopy*" verde che nella parete controllo priva di essenze vegetali, verranno utilizzate almeno 2 cartucce per avere due repliche del risultato.
2. Rispetto all'ipotesi 2 Per gli altri 2-3 casi studio, sia per il campionamento a livello della "*canopy*" verde che nella parete controllo priva di essenze vegetali, verranno utilizzate almeno 2 cartucce per avere due repliche del risultato.
3. Rispetto all'ipotesi 3 La valutazione dell'effetto del verde sulla concentrazione di COV *indoor* verrà effettuata sempre all'interno dell'edificio ENEA. Dato che i processi di ventilazione, infiltrazione e intrusione danno luogo ad uno scambio costante tra l'aria *indoor* e quella *outdoor*; è importante confrontare i risultati ottenuti negli ambienti confinati con i simultanei campionamenti dell'aria *outdoor*. Pertanto, saranno predisposte due cartucce nell'ambiente interno fiancheggiante la parete verde e 2 cartucce a livello della "*canopy*" della parete verde (queste ultime valide anche per l'ipotesi 1). Allo stesso modo, saranno predisposte due cartucce nell'ambiente interno fiancheggiante la parte controllo priva di copertura verde e 2 cartucce a livello della parete controllo priva di copertura (queste ultime valide anche per l'ipotesi 1).

Per quanto riguarda i casi studio per effettuare un'analisi comparativa su piccola scala rispetto alle essenze vegetali (tenendo in considerazione che comunque le condizioni microclimatiche e di inquinamento ambientale saranno differenti), abbiamo pensato a queste possibili pareti verdi (**Figura 19**):

- a) Parete verde (giardino verticale) del liceo Keplero di Roma. La parete è stata premiata da ECOTechGREEN 2018.
- b) Parete verde tradizionale in centro città (Roma)
- c) Parete verde tradizionale in centro città (Bracciano)

	
a) Parete verde realizzata presso il liceo Keplero di Roma e premiata da ECOTechGREEN 2018	
	
b) Parete verde tradizionale nel centro della città (Roma)	c) Parete verde tradizionale centro urbanizzato (Bracciano, Roma)

Figura 19. Possibili casi studio di pareti verdi.

3 Tetto verde

La composizione del prototipo di tetto verde ENEA di tipo estensivo comprende tre settori distinti da una diversa tipologia di vegetazione:

- a) **Appezamento a prato a zolle.** La superficie più ampia è coperta da un prato composto da un mix di piante microterme del tipo *Poa pratensis* e *Festuca arundinacea* appartenenti alla famiglia delle Graminaceae.
- b) **Appezamento a *Sedum*.** Una parte meno estesa è coperta da un mix di specie del genere *Sedum* appartenenti alla famiglia delle Crassulaceae, selezionate precedentemente in ENEA tra una collezione di accessioni diffuse in ambiente Mediterraneo per il prototipo di tetto [14].
- c) **Appezamento a specie spontanee.** Una parte del tetto è costituita da un prato in cui sono state inserite delle specie erbacee spontanee della famiglia delle Verbenaceae e della famiglia delle Boraginaceae. Queste specie si caratterizzano per una bassa richiesta idrica, scarsa necessità di manutenzione ed inoltre favoriscono la colonizzazione di una elevata biodiversità locale, costituita soprattutto da api ed insetti impollinatori.

Il prototipo di tetto verde è stato realizzato con la finalità di realizzare un prato con ridotta richiesta idrica, “dry garden”. Il tetto è provvisto di un sistema di irrigazione automatico. I turni e i volumi di irrigazione sono stati programmati in accordo alle specie vegetali e alle condizioni climatiche. Il prato a zolle ha dimostrato di richiedere un maggiore apporto idrico.

Durante l’anno 2019, sulle tre tipologie di coltre vegetale sono stati collezionati dati non strutturati riguardanti il ciclo biologico delle piante, il livello di copertura del manto verde (estensione e spessore) e le caratteristiche fogliari. Tutte queste informazioni saranno analizzate in relazione all’insieme dei dati strutturati registrati in continuo dalla sensoristica installata sul tetto.

3.1 Sperimentazione su appezamento a prato spontaneo

La sperimentazione nell’appezamento delle erbacee spontanee è stata realizzata in linea con le “green policy” focalizzate a migliorare la biodiversità delle città. Scopo dello studio è stato quello di verificare la fattibilità di impiego di coltri vegetali ad elevato valore ecologico in alternativa a prati a zolle nei tetti verdi. A tal fine è stato allestito uno spazio che ospita specie di piante con particolari caratteristiche botaniche (es. periodo di fioritura), richiesta idrica contenuta e limitata manutenzione, sia di origine Mediterranee che di altre zone. Tra le 250 piante spontanee presenti nel Mediterraneo e riportate nel Manuale Ispra [15], come specie adatte all’inverdimento urbano e pensile, sono state scelte due specie del genere *Echium*, *E. vulgare* e *E. plantagineum*, caratterizzate anche da una lunga fioritura. La specie non nativa *Phyla nodiflora* L. Greene (*Lippia nodiflora*) originaria del Sud America, invece, è stata scelta in base a studi di settore (portale italiano EcoProspettive) che la vedono come specie di interesse sia per il “dry garden” che per l’incremento della biodiversità urbana.

Le specie utilizzate in questa porzione di tetto verde (ulteriormente suddivisa in tre comparti per consentire la replica della sperimentazione) sono state analizzate in funzione dei principali parametri utili a stimare la potenzialità di efficienza energetica (LAI e albedo elevati, velocità di accrescimento, ecc.). Sotto il profilo del contributo al miglioramento dell’efficienza energetica dell’edificio, l’attività svolta ha consentito le seguenti considerazioni:

- il ciclo vegetativo delle specie testate ha consentito una copertura verde delle superfici orizzontali dell’edificio praticamente per tutto il periodo primavera-estate;
- il prato spontaneo non ha avuto necessità di manutenzione e si è autorigenerato;
- il portamento e le caratteristiche fogliari hanno dimostrato un ombreggiamento completo rispetto alla radiazione solare incidente.

Sulla base di questi primi risultati, gli obiettivi del prossimo anno prevedono di verificare se:

- il colore verde-chiaro delle specie consente una buona riflessione della radiazione solare (albedo) e una scarsa emissività con vantaggi nei confronti dell'ambiente circostante in termini di temperatura dell'aria che non si riscalda eccessivamente;
- le caratteristiche sopra riportate favoriscono un migliore "comfort" degli ambienti interni sottostanti la vegetazione.

La sperimentazione mostrata in **Figura 20** è iniziata a dicembre 2018 con la semina di un mix di semi commerciali di *Echium* nelle bordure dell'appezzamento (**Figura 20 A e B**). Nello stesso periodo sono state messe a dimora 80 piantine di *Phyla nodiflora*, piantate in modo omogeneo all'interno dei tre comparti, con una percentuale di copertura inferiore all'1%. Nel periodo dicembre 2018-marzo 2019 l'appezzamento è stato protetto dal freddo con un telo di copertura. A marzo si è evidenziato un ottimo sviluppo vegetativo dei semi di *Echium* che hanno sviluppato una consistente bordura, mentre non si è avuto alcuno sviluppo significativo per le piantine di *Phyla nodiflora* (**Figura 20C**). A maggio, il mix di *Echium* ha completato lo sviluppo vegetativo ed è entrato in fioritura, mentre la *P. nodiflora* ha sviluppato stoloni superficiali che si estendono su larga parte del terreno (**Figura 20D**). Ad agosto, la *P. nodiflora* ha mostrato una percentuale di copertura del terreno del 100% ed un'abbondante fioritura utile per attirare insetti pronubi, mentre il mix di piantine di *Echium* ha mostrato una senescenza precoce, dovuta probabilmente al basso spessore (8 cm) del substrato del tetto (**Figura 20 E e F**).

Al fine di valutare le capacità autorigenerative e la resistenza alla siccità delle specie in studio, nella parte finale del mese di agosto, questa parte di appezzamento è stata sottoposta a stress idrico interrompendo l'irrigazione automatica per circa un mese. Alla fine del mese di settembre, il prato è risultato completamente senescente (**Figura 20 G**). A dicembre, si evidenzia la ripresa vegetativa sia della *P. nodiflora* che di *Echium* con la seconda fioritura annuale (**Figura 20 H**).



Figura 20. Andamento della crescita del prato spontaneo.

3.2 Aggiornamento sensoristica per il monitoraggio microclimatico

Nel corso del 2019 è stata ampliata la sensoristica per il monitoraggio delle condizioni ambientali e microclimatiche preesistente sul tetto con l'inserimento di sensori per misurare la radiazione ultravioletta (UVA e UVB) e la temperatura superficiale in particolare del comparto a *Sedum*. In **Tabella 1** è riportato lo stato attuale della sensoristica. Nella **Figura 21** è invece evidenziata, in giallo, la posizione dei sensori di nuovo inserimento. Questi sensori consentiranno durante il 2020 di effettuare una stima dell'influenza delle diverse tipologie di vegetazione di un tetto verde, di tipo estensivo, sulla riduzione delle temperature superficiali. I dati termici rilevati sotto il prato a *Sedum* verranno confrontati con quelli rilevati sotto il prato a zolle.

Tabella 1. Sensoristica installata sul tetto verde

	prato a zolle	prato a <i>Sedum</i>	prato a specie spontanee	Stazione climatica e ambientale
Radiazione UVA/UVB				X
Velocità e direzione del vento				X
Temperatura e umidità dell'aria				X
Radiazione globale e PAR				X
Pluviometro				X
Temperatura superficiale	X	X		X
Temperatura e umidità del suolo	X	X	X	X
Temperatura fogliare (IR)	X			



Figura 21. Disposizione nuovi sensori su tetto verde di tipo estensivo

3.3 Studio dell'albedo nei tetti verdi

Nelle città l'uso di materiali edilizi a basso albedo è una delle cause dell'isola di calore urbano. Le elevate temperature che si raggiungono nelle città comportano incrementi nei costi di consumo energetico, peggiorano le condizioni di comfort microclimatico e amplificano il problema dell'inquinamento ambientale dell'aria. Considerando un aumento globale dell'albedo in una città, per un aumento di 0.1 di albedo si

ottiene una riduzione della temperatura media pari a 0.3 °C e una riduzione del picco di temperatura ambiente pari a 0.9 °C. I guadagni sul carico di raffreddamento delle superfici ad alto albedo sono dell'ordine del 10-40% in estate [4]. Tra le strategie di mitigazione dell'isola di calore urbano rientrano i tetti verdi; infatti, per una temperatura dell'aria ambiente di 33°C, viene riportata una temperatura superficiale del tetto di 68 °C per un tetto nero, di 42 °C per un tetto "riflettivo" bianco e compresa tra 31 e 38 °C per un tetto verde. In questo ultimo caso, il guadagno per le superfici verdi non è dovuto interamente alle proprietà radiative ma per gran parte all'azione evapotraspirativa della copertura vegetale [16].

Per una maggiore definizione energetica dei sistemi verdi in relazione alla loro caratteristica di albedo è stato acquistato un albedometro. Il fine della ricerca è quello di misurare l'albedo a livello di diverse specie vegetali, o di associazioni di specie vegetali, soprattutto in sistemi di verde orizzontale quale i tetti verdi. Date le nostre esigenze sperimentali, abbiamo selezionato uno strumento che avesse la possibilità di essere spostato e trasportabile, per poter effettuare campagne di misurazione in differenti siti.

Per definizione, l'albedo di una superficie è la frazione di luce o, più in generale, di radiazione incidente che viene riflessa e non assorbita. L'albedo massimo è 1 quando tutta la luce incidente viene riflessa, mentre l'albedo minimo è 0 quando nessuna frazione della luce viene riflessa. In termini di luce visibile, il primo caso è quello di un oggetto perfettamente bianco, l'altro di un oggetto perfettamente nero. Nel caso di un prato si riporta genericamente un albedo di 0,15. Nel 2020, i valori di albedo saranno misurati su diverse tipologie vegetali per effettuare una scelta più appropriata di specie vegetali da inserire nei sistemi verdi ai fini del miglioramento dell'efficienza energetica degli edifici e per contrastare l'isola di calore nei centri urbanizzati. L'albedometro è costituito da una coppia di piranometri a termopila contrapposti (Figura 22) uno rivolto verso l'alto, che misura la radiazione solare globale (somma della radiazione diretta, di quella diffusa e di quella riflessa) incidente sulla superficie orizzontale verde di cui si vuole misurare l'albedo, e uno rivolto verso il basso, che misura la radiazione solare globale riflessa da questa superficie verde. L'albedo è la frazione di radiazione riflessa dal suolo rispetto alla radiazione incidente:

$$\text{ALBEDO} = \frac{\text{RADIAZIONE GLOBALE RIFLESSA}}{\text{RADIAZIONE GLOBALE INCIDENTE}}$$

L'albedometro scelto misura nel campo spettrale 0.3 μm ÷ 3 μm ed ha un errore di linearità < 1%. È uno strumento robusto, affidabile, previsto per sopportare condizioni climatiche avverse e adatto anche per l'installazione in campo. Lo strumento è corredato da un *datalogger wireless*.



Figura 22. Albedometro

Durante l'anno 2020 saranno previste delle campagne per la misurazione di albedo. In particolare, le analisi verranno condotte sulla vegetazione del prototipo di tetto verde ENEA. Verranno considerate diverse zone del tetto che si contraddistinguono per la vegetazione presente e, nell'appezzamento del tetto coperto a prato, saranno selezionate diverse altezze del tappeto erboso. Saranno inoltre condotte delle misure di albedo su parcelle di prati spontanei in altre località valutando l'albedo sia rispetto all'altezza delle piante che alla loro densità e spessore.

4 Serra bioclimatica

Le serre bioclimatiche (anche dette “serre solari” o “captanti”) sono volumi realizzati in metallo e vetro o materiali plastici trasparenti, finalizzati a raccogliere e conservare la luce e il calore solari. Dal punto di vista dell'efficienza energetica, la loro funzione è quella di consentire un considerevole risparmio energetico sfruttando spazi esterni di una unità abitativa, come un balcone, un terrazzo o una corte. La ricerca si muove per migliorare i livelli di comfort interno riducendo il consumo di energia non rinnovabile per il condizionamento degli ambienti interni.

4.1 Normative

Il legislatore, con l'obiettivo di incentivare comportamenti sostenibili dal punto di vista ambientale, ha previsto un regime premiale per le serre bioclimatiche, variabile da Regione a Regione e da Comune a Comune; infatti, tali serre sono incentivate e promosse nei progetti di pianificazione urbana, anche se dal punto di vista dell'edificio, essendo assimilate ad un volume tecnico, non vanno considerate per il calcolo del volume dell'edificio e quindi sono escluse dalla pianificazione urbana. Tuttavia, per essere considerata come tale, una serra solare deve soddisfare una serie di requisiti, spesso variabili da comune a comune, in particolare:

- La serra non deve essere riscaldata dal sistema di climatizzazione dell'edificio o dell'abitazione a cui è annessa.
- Il progetto deve valutare il guadagno energetico, tenuto conto dell'irraggiamento solare, calcolato secondo le normative UNI, durante tutta la stagione di riscaldamento. Come guadagno si intende la differenza tra energia dispersa in assenza e in presenza stesso della serra bioclimatica.
- Deve essere orientata nell'arco tra Sud-Est e Sud-Ovest.
- La superficie vetrata deve essere prevalente, con un rapporto tra superficie vetrata e superficie totale (verticale, orizzontale e inclinata) di almeno il 70%; in alcuni casi le amministrazioni richiedono il 100%.
- Il progettista deve allegare il progetto di costruzione della serra bioclimatica ed includere i calcoli energetici che dimostrano la capacità di ridurre almeno il 10% del fabbisogno di energia primaria per la climatizzazione invernale, tramite sfruttamento passivo e/o attivo dell'energia solare.
- La serra deve essere apribile per una superficie pari ad almeno un terzo dello sviluppo dell'involucro solare e dotata di schermature e/o dispositivi mobili o rimovibili, per evitare il surriscaldamento estivo, atte a ridurre almeno del 70% l'irradiazione solare massima durante il periodo estivo.
- Il volume lordo della serra non può generalmente superare il 10% del volume riscaldato dell'edificio (variabile, tuttavia, fino al 20%).
- Deve essere dotata di un sistema di ombreggiamento estivo e finestre apribili per consentire la ventilazione naturale invernale sia in estate che in inverno.
- La destinazione funzionale non deve determinare la nascita di una nuova stanza della per la presenza continua di persone; in pratica, non deve essere legalmente stabilito come luogo di vita e/o di lavoro.
- Deve garantire un guadagno energetico durante la stagione invernale di almeno il 20% rispetto alla soluzione priva di energia solare (variabile tra il 5% e il 25%).

Le serre bioclimatiche sono state riconosciute come valide strategie per migliorare le prestazioni energetiche degli edifici e pertanto sono stati definiti i parametri descrittivi e di calcolo. Di seguito, le prime regioni che hanno integrato il sistema serra nella legislazione regionale (L.R.):

- Umbria: la L.R. 20 dicembre 2000 n. 38, "Riduzioni nel calcolo dei parametri di pianificazione urbana per il miglioramento del comfort ambientale e del risparmio energetico negli edifici", definisce per la prima volta le serre solari non riscaldate con funzione di raccolta solare come volumi espressamente finalizzati all'ottenimento del comfort ambientale e al risparmio energetico attraverso il miglioramento dell'isolamento e la raccolta diretta di energia solare.

- Lombardia: la delibera n. X/1216 del 10 gennaio 2014 ha approvato un documento denominato "Criteri per il riconoscimento della funzione bioclimatica di serre e portici, ai fini del loro confronto con i volumi tecnici", che fa riferimento alla L.R. 21 dicembre 2004 n. 39.
- Lazio: la L.R. 27 maggio 2008 n. 6 determina la deduzione dei volumi urbani di serre solari costruite sia in aderenza che adiacenti con una superficie non superiore al 30% della superficie dell'unità abitativa costruita.
- Toscana: la L.R. 24 luglio 2018 n. 39/R decreta la detrazione dal calcolo della superficie costruibile (BS) e della superficie coperta (CS) della serra solare, che, tuttavia, è incluso nel calcolo della superficie accessoria (AS). La serra solare è definita come "un elemento di architettura bioclimatica finalizzato ad introitare la radiazione solare coadiuvando nella stagione invernale il riscaldamento dell'edificio e dell'unità immobiliare".

Un elenco per la completezza delle informazioni sulla legislazione regionale include anche:

- Legge regionale della Regione Piemonte, 28 maggio 2007, n. 13.
- Regione Veneto Allegato A, del D.G.R. n. 1781, art. 1, dell'8 novembre 2011.
- La Legge della Regione Veneto n. 13/2011.
- Regione Friuli Venezia Giulia L. R. 11/11/2009, n. 19, art. 37.
- Regione Emilia Romagna L.R. 23/12/2004 n. 26, modificato da L.R. del 22/12/2011 n. 21.
- Regione 11 Puglia, Legge Regionale, n. 13, "Standard per una vita sostenibile".

4.2 Prototipo ENEA

L'azione progettuale dell'ENEA sull'impiego di serre bioclimatiche per migliorare l'efficienza energetica degli edifici, svolta nell'ambito del precedente programma, ha previsto la realizzazione di una serra bioclimatica sull'edificio dimostrativo ENEA ([Figura 23](#)). La struttura è stata progettata su una porzione di terrazzo al primo piano dell'edificio, a ridosso del parapetto della terrazza. L'accesso alla serra solare è dall'esterno, tuttavia la serra comunica con l'ambiente interno attraverso una finestra che divide i volumi interni della serra solare e dell'abitazione. La serra ha una superficie coperta di 7,5 mq per un volume complessivo di 20 m³, esposizione Sud-Ovest; l'impalcatura è stata realizzata con tubi scatolati in acciaio, con struttura trasparente verticale a vetro di 5 mm e finestrature scorrevoli su binari a tutta superficie e, al di sopra, struttura trasparente inclinata (una falda) composta da lastra in polycarbonato compatto con trattamento anti UV spessore 10 mm. La superficie inclinata e le finestrature verticali della serra sono protette internamente con una schermatura solare interna mobile a capanno, con guide laterali (binari) a struttura fissa e con funzionamento automatico azionato da motori elettrici su tutta la lunghezza. Un sistema schermante mobile verticale sia interno che esterno per la parete frontale con funzionamento automatico azionato da motori elettrici completa la funzionalità di ombreggiamento. I risultati della sperimentazione effettuata nelle precedenti annualità, svolta in collaborazione con l'Università di Pisa, sono riportati nei report RdS ENEA [12] [13] [17]. Principalmente, le simulazioni condotte con il software Energy Plus hanno evidenziato il contributo della serra bioclimatica al miglioramento delle condizioni di comfort interno della stanza adiacente alla serra. Durante la stagione invernale, i livelli di energia [kWh] dovuti all'irraggiamento diminuiscono mediamente del 70% dopo l'installazione della serra; nel periodo estivo, si evince che, per limitare il surriscaldamento della serra bioclimatica, è comunque necessaria una schermatura ombreggiante e una ventilazione naturale attraverso opportune finestrature.



Figura 23. Prototipo di serra bioclimatica sull'edificio F92 "casa delle energie" dell'ENEA, Casaccia

4.3 Implementazione della sensoristica

Di seguito, sono riportati i sensori per il monitoraggio microclimatico-ambientale installati all'interno della serra bioclimatica e nella stanza adiacente per lo studio del raffrescamento estivo dovuto alla vegetazione che sarà inserita nella serra all'inizio del secondo anno di attività.

Sensori nella serra bioclimatica:

- temperatura (T) e umidità dell'aria (RH)
- radiazione globale (GR) e radiazione fotosintetica attiva (PAR)
- temperatura (ST) e umidità (SM) del suolo*
- CO₂**

Sensori nella stanza adiacente:

- temperatura (T) e umidità dell'aria (RH)
- CO₂**

* Il sensore di T e RH del suolo è stato predisposto per la sperimentazione che verrà svolta nel 2020 con l'introduzione di un sistema verde.

** I sensori per la concentrazione di CO₂ in serra bioclimatica e nella stanza adiacente al momento sono stati solo installati. Attualmente sono in attesa di una manutenzione, ma verranno attivati il più presto possibile nel secondo anno progettuale.

La localizzazione dei sensori è mostrata in Figura 24.

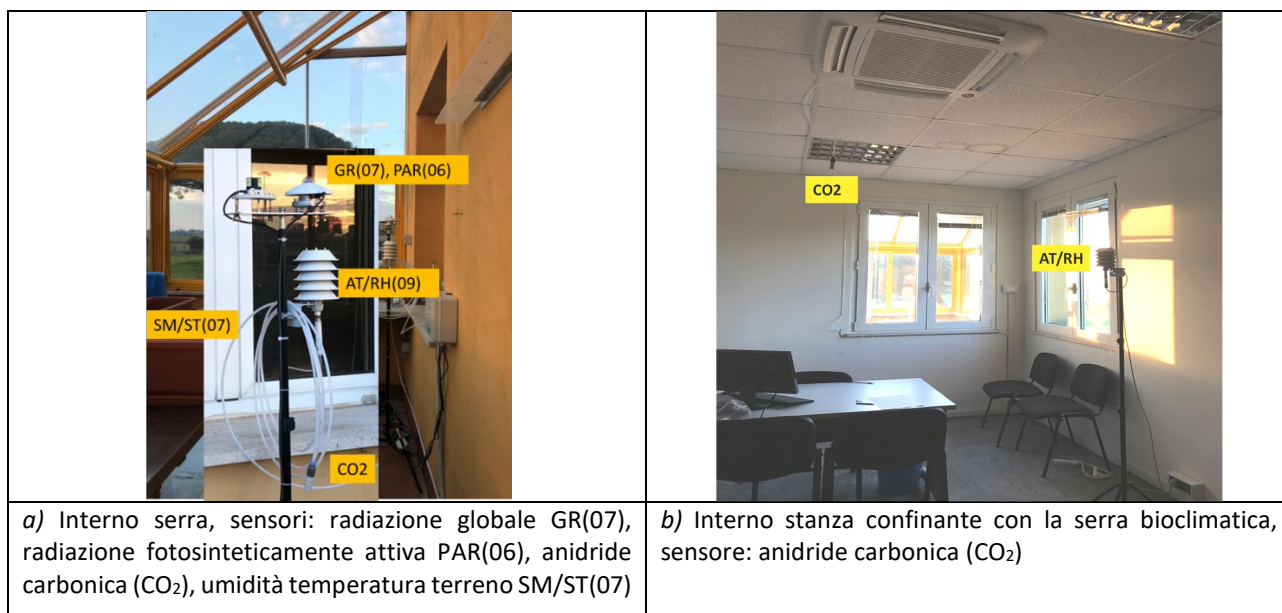


Figura 24. Sensoristica all'interno della serra bioclimatica e della stanza confinante.

4.4 Evapotraspirazione delle specie vegetali

Tutte le funzioni vitali della pianta (respirazione, fotosintesi, accrescimento) sono influenzate dalla disponibilità idrica. Le radici sono ricoperte da numerose microscopiche sottili estroflessioni delle cellule dell'epidermide detti peli radicali. L'acqua penetra nei peli radicali attraverso un meccanismo di imbibizione: la linfa grezza dal pelo radicale attraversa, per gradiente osmotico, le cellule dell'epidermide e quelle della corteccia fino a raggiungere i vasi legnosi; in seguito, attraverso lo xilema, la linfa sale in alto lungo il fusto fino alle foglie. Questo flusso di acqua verso l'alto è chiamato corrente di traspirazione. L'acqua, attraverso una fitta rete di fasci vascolari collegati ai vasi legnosi, si insinua tra le cellule del mesofillo delle foglie e da qui, grazie alle sue proprietà di adesione e capillarità, giunge alle camere sottostomatiche e da queste evapora nell'atmosfera attraverso gli stomi, microscopiche aperture presenti su tutte le parti erbacee delle piante e soprattutto sulle pagine inferiori delle foglie (**Figura 25**). La principale funzione degli stomi è proprio quella di facilitare lo scambio gassoso con l'esterno. In particolare, la traspirazione fogliare ha luogo per circa il 95% a livello stomatico e per circa il 5% a livello della cuticola. La resistenza al passaggio del vapore d'acqua dello strato limite della cuticola è proporzionale al suo spessore. La resistenza stomatica è regolata dall'apertura e chiusura degli stomi.

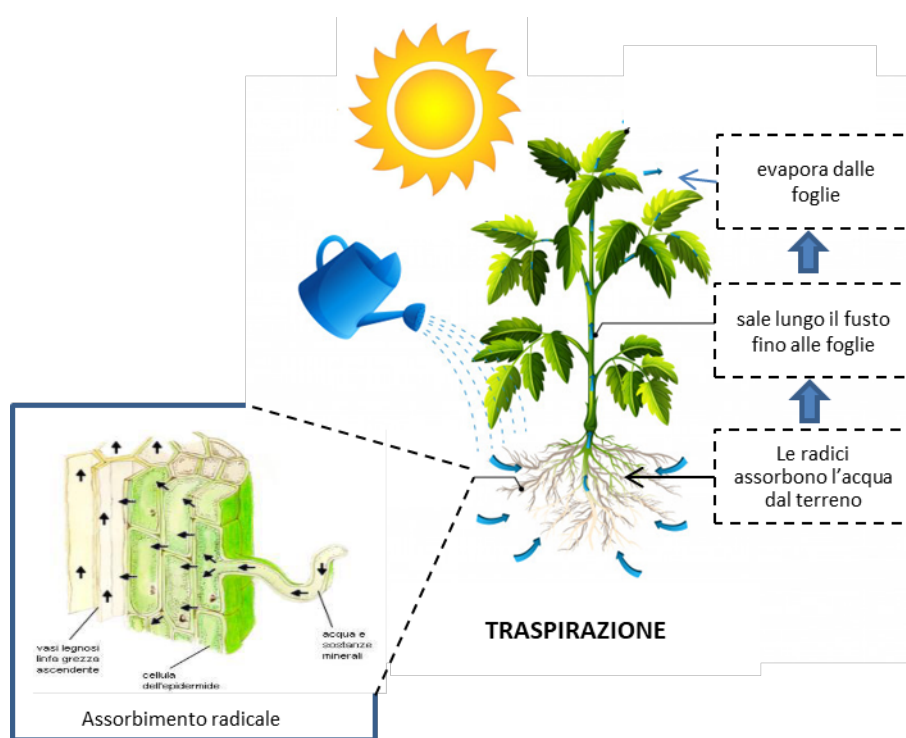


Figura 25. Corrente di traspirazione (immagine elaborata a partire da diversi contenuti disponibili in rete).

La maggior parte dell'acqua assorbita dalla pianta viene traspirata nell'atmosfera, svolgendo la funzione termoregolatrice, in quanto il passaggio dell'acqua dallo stato liquido a quello di vapore assorbe energia determinando un abbassamento della temperatura dell'atmosfera intorno alle foglie. L'acqua che entra nella costituzione della pianta e viene fissata nella sostanza organica, chiamata *acqua costituzionale*, è solo una piccolissima parte dell'acqua assorbita dall'apparato radicale (circa 1 – 1,5%): il 99% di questa viene eliminata nell'atmosfera sotto forma di vapore durante il processo di traspirazione. In una tipica giornata estiva, vi è un rapido aumento di traspirazione durante le ore del mattino, raggiungendo un picco massimo nel primo pomeriggio; segue una progressiva diminuzione fino a ridursi a valori molto bassi o nulli durante la notte.

4.4.1 Stima dell'evapotraspirazione delle colture

L'evapotraspirazione misura la quantità d'acqua per unità di tempo che, per effetto congiunto della traspirazione delle piante (T) e dell'evaporazione dal suolo (E), allo stato di vapore si disperde nell'atmosfera. In una coltura, l'evapotraspirazione dipende anche dal grado di copertura della vegetazione presente e, ovviamente, dalla quantità d'acqua disponibile. A suolo nudo, o nelle prime fasi di sviluppo della coltura, l'evaporazione sarà più elevata rispetto a quando il terreno è coperto dalle piante. Inizialmente, quindi, l'evaporazione sarà la componente principale dell'evapotraspirazione, per poi progressivamente diventarne una frazione modesta.

L' **evapotraspirazione potenziale di riferimento (ET_0)** è la quantità di acqua dispersa nell'atmosfera da una coltura standard in condizioni ottimali di disponibilità idrica e in assenza di fattori di stress; essa è strettamente correlata alle variabili meteorologiche (radiazione solare, temperatura e umidità dell'aria,

$$ET_c = ET_0 \times K_c$$

L' ET_c è l'evapotraspirazione potenziale e si riferisce alla quantità massima di acqua che può essere persa nell'unità di tempo per evaporazione e traspirazione da parte di una determinata coltura coltivata in condizioni favorevoli che includono: un ottimo livello di umidità del terreno, un terreno molto esteso e livellato con un ricco contenuto di nutrienti, assenza di stress abiotici e biotici per le piante, una copertura omogenea del terreno da parte della coltura vegetale, ed un'altezza del verde mantenuta a circa 10-15 cm.

L'**evapotraspirazione reale (ET_R)** fa riferimento ad un contesto reale, pertanto è definita come il quantitativo d'acqua realmente persa nell'unità di tempo per evaporazione e traspirazione da una coltura. La massima attività assimilatoria di un vegetale si ha quando l'evaporazione reale è pari a ET_c . Si può tentare di realizzare questo obiettivo cercando di incrementare ET_R , ad esempio aumentando la disponibilità idrica per la coltura, favorendo la capacità di accumulo dell'acqua nel terreno, limitando la lisciviazione di nutrienti con sistemi di accumulo dell'acqua piovana o apportando sostanza organica che, trasformandosi in humus, aumenta notevolmente la capacità di ritenzione idrica del suolo. Diversamente, ridurre ET_c significa diminuire l'apporto d'energia a livello delle foglie. Questo risultato può essere perseguito ad esempio riducendo la radiazione eccessiva mediante delle reti ombreggianti; aumentando l'umidità relativa dell'aria mediante appositi impianti di irrigazione con i quali l'acqua viene nebulizzata al di sopra delle colture (irrigazione nebulizzante); frenando i movimenti d'aria con l'adozione di frangivento che, in caso di frangivento vivi, contribuiscono alla riduzione di ET_c anche incrementando l'umidità dell'aria attraverso la traspirazione.

velocità del vento) e non è influenzata dai processi fisiologici della coltura. La coltura di riferimento è il prato di *Festuca arundinacea*. Questo prato ideale di *Festuca* deve essere fitto, basso e uniforme in modo da coprire completamente il terreno senza lasciarne alcuno spazio vuoto, eliminando così la variabilità causata da una diversa densità di piante per unità di superficie. Inoltre, lo strato di *Festuca* deve trovarsi in piena attività vegetativa in modo da rimuovere la variabilità determinata dal diverso stadio di accrescimento in cui si trova la coltura. Il contenuto idrico del suolo deve essere ottimale e mantenuto costante in modo da eliminare la variabilità delle sue fluttuazioni. L'adozione di condizioni standard determina l'evapotraspirazione dipenda esclusivamente dal potere evaporante dell'atmosfera poichè tutti gli altri fattori sono stati normalizzati [18]. L'evapotraspirazione potenziale di riferimento rappresenta il valore base per la stima dei fabbisogni idrici di tutte le colture agrarie. Quando le condizioni di campo differiscono da quelle standard, l'**evapotraspirazione potenziale della coltura (ET_c)** si ottiene moltiplicando l'evapotraspirazione di riferimento, ET_0 , per un **coefficiente colturale K_c** specifico per ogni coltura che tiene conto della traspirazione, dell'evaporazione del suolo e delle caratteristiche colturali, infatti, varia durante il periodo di crescita della coltura poichè variano le condizioni di copertura del suolo, l'altezza della pianta e l'estensione di area fogliare [18].

4.4.2 Il coefficiente colturale K_c

Differenti specie di piante hanno differenti capacità evapotraspirative che determinano specifici coefficienti colturale (K_c). I coefficienti colturali, calcolati sperimentalmente e riconosciuti dalla FAO [18], sono stati determinati sperimentalmente come rapporto ET_c/ET_0 per le diverse colture e sono stati modificati in funzione delle caratteristiche ambientali.

Per la determinazione del K_c nelle colture erbacee è stato suddiviso il ciclo biologico di ciascuna coltura in quattro fasi:

- **Fase iniziale:** dalla semina al momento in cui la coltura ricopre circa il 10% del terreno.
- **Fase di crescita:** dalla fine della fase precedente fino al raggiungimento della quasi totale copertura del suolo da parte della coltura.
- **Fase di pieno sviluppo:** la copertura è al suo massimo e la coltura è in pieno rigoglio vegetativo. Questa fase è caratterizzata dai valori di K_c più alti.
- **Fase di maturazione:** dalla fine della fase precedente, progredisce con la senescenza del fogliame fino al completamento della maturazione.

I cambiamenti nella vegetazione e nella copertura del suolo significano che il coefficiente di coltura K_c varia durante il periodo di crescita e quindi avremo un valore del coefficiente per la fase iniziale ($K_{c,i}$), la fase intermedia ($K_{c,int}$) e la fase finale ($K_{c,f}$) (vedi **Tabella 2**). Di solito c'è una stretta somiglianza nei coefficienti tra i membri dello stesso gruppo di colture, poiché l'altezza della pianta, l'area delle foglie, la copertura del suolo e la gestione dell'acqua sono normalmente simili.

Tabella 2. Coefficienti culturali (K_c) nella fase iniziale (i), nella fase intermedia (int) e nella fase finale (f) del ciclo biologico di ciascuna coltura vegetale

Coltura vegetale	$K_{c,i}$	$K_{c,int}$	$K_{c,f}$
Verdure piccole (lattuga, broccoli, cavoli, carote, sedano, aglio, spinaci, ravanelli, ecc.)	0,7	1,05	0,95
Famiglia delle Solanacee (melanzane, peperoni, pomodori, ecc.)	0,6	1,15	0,80
Famiglia delle Cucurbitacee (cetriolo, zucca, zucchine, meloni, anguria, ecc.)	0,5	1,00	0,80
Radici e tuberi (barbabietole, patate, rape, ecc.)	0,5	1,10	0,95
Leguminose (fagioli, ceci, fave, arachidi, lenticchia, piselli, ecc.)	0,4	1,15	0,55
Verdure perenni (carciofi, asparagi, menta, fragole, ecc.)	0,5	1,00	0,80
Colture oleaginose (colza, sesamo, girasole, ecc.)	0,35	1,15	0,35
Cereali (orzo, avena, grano, mais miglio, riso, ecc.)	0,3	1,15	0,4
Erba del tappeto erboso			
- stagione fredda	0,90	0,95	0,95
- stagione calda	0,80	0,85	0,85
Palme da dattero	0,90	0,95	0,95
Palme	0,95	1,00	1,00
Uva			
- da tavolo o uva passa	0,30	0,85	0,45
- da vino	0,30	0,70	0,45
Mandorle (nessuna copertura del terreno)	0,40	0,90	0,65
Avocado, nessuna copertura al suolo	0,60	0,85	0,75
Agrumi, nessuna copertura del suolo			
- copertura al 70%	0,70	0,65	0,70
- copertura al 50%	0,65	0,60	0,65
- copertura al 20%	0,50	0,45	0,55
Colture in fibra	0,35		
- cotone		1,15-	0,70-0,50
- lino		1,20	0,25
		1,10	

(Fonte: FAO, <http://www.fao.org>)

È stato dimostrato che l'altezza delle piante è correlata in modo direttamente proporzionale con il valore del K_c , pertanto il rapporto K_c/h durante i diversi stadi fenologici rimane per lo più costante (dati Progetto SEGIF).

4.4.3 Metodi di misura dell'evapotraspirazione

L'ET può essere espressa in millimetri per unità di tempo (mm/h), millimetri per unità di superficie per unità di tempo (m^3/ha giorno) e come unità di energia necessaria a far evaporare l'acqua ricevuta per unità di superficie (MJ/m^2 giorno) [19]. Normalmente la stima della ET_c è effettuata attraverso metodi diretti o indiretti. I metodi diretti misurano la variazione di peso (con bilance, metodo gravimetrico), la variazione della tensione matriciale (tensiometri) oppure del contenuto idrico volumetrico (sensori dielettrici) del substrato di una o più piante, mentre i metodi indiretti stimano l'evapotraspirazione sulla base delle condizioni climatiche e dello sviluppo fogliare della pianta [20].

4.4.4 Pianificazione del protocollo di ricerca

Il nostro obiettivo è di introdurre un "allestimento vegetale" all'interno della serra bioclimatica che, grazie ai fenomeni evapotraspirativi delle piante, favorisca il raffrescamento dello spazio abitato nei periodi estivi determinando una riduzione della spesa elettrica per la climatizzazione estiva.

L'attenzione è ricaduta su specie orticole in quanto anche in Italia l'agricoltura urbana/domestica è ormai una realtà consolidata. La possibilità di fare agricoltura su balconi e terrazzi rappresenta un'opportunità per le famiglie di consumare cibi sani e di freschi.

La ricerca bibliografica eseguita nel corso del primo anno ha portato alla individuazione di Linee guida prodotte dalla FAO [18] in cui sono riportati i valori dei coefficienti di coltura (K_c) (Tabella 1) relativi alla evapotraspirazione di differenti piante coltivate in diverse parti del Mondo, compreso il Mediterraneo. In particolare, gli studi condotti dalla FAO hanno portato alla individuazione dei valori di K_c di ciascuna pianta nelle tre differenti fasi del ciclo biologico (fase iniziale ($K_{c,i}$), la fase intermedia ($K_{c,int}$) e la fase finale ($K_{c,f}$)) ed a classificare la durata delle fasi di sviluppo delle specie vegetali, nei diversi periodi di impianto e aree geografiche/climatiche.

Ai fini del progetto abbiamo scelto, quale criterio di selezione per individuare le piante da inserire nei "sistemi verdi", di considerare il valore di K_c relativo alla fase di pieno sviluppo vegetativo (*i.e.*, $K_{c,int}$). In questa fase la pianta è infatti in pieno rigoglio vegetativo e i valori di K_c sono i più alti dell'intero ciclo. Alti valori di K_c garantiscono un maggior effetto evapotraspirativo da parte della pianta permettendo di svolgere al meglio la funzione termoregolatrice all'interno di uno spazio contenuto come quello della serra bioclimatica. In aggiunta, la lunghezza della fase del ciclo biologico in cui la pianta esibisce la maggior area superficiale (in particolare superficie fogliare) costituisce un altro parametro che deve essere considerato al fine di selezionare le piante potenzialmente più adatte all'obiettivo della nostra ricerca. Nella Tabella 3 vengono riportate le durate (in numero di giorni) dei cicli biologici di alcune colture vegetali, scelte dall'elenco fornito dalla FAO, rispetto al periodo dell'anno in cui vengono generalmente impiantate e all'area geografico-climatica delle rilevazioni.

Tabella 3. Durata delle fasi di sviluppo delle colture in vari periodi di impianto e diverse regioni climatiche (in n° di giorni)

	Durata fase iniziale	Durata fase di crescita	Durata fase di pieno sviluppo	Durata fase di maturazione	Totale	Mese/periodo di impianto	Area geografico-climatiche
Lattuga	20	30	15	10	75	apr	Mediterraneo
	30	40	25	10	105	nov/gen	Mediterraneo
	25	35	30	10	100	ott/nov	regione arida
	35	50	45	10	140	feb	Mediterraneo
Cavolfiore	35	50	40	15	140	set	deserto della California (USA)
Pomodoro	30	40	40	25	135	gen	regione arida
	35	40	50	30	155	apr/mag	California (USA)
	25	40	60	30	155	gen	deserto della California (USA)
	35	45	70	30	180	ott /nov	regione arida
	30	40	45	30	145	apr/mag	Mediterraneo
Sedano	25	40	95	20	180	ott	regioni semi-arida
	25	40	45	15	125	apr	Mediterraneo
	30	55	105	20	210	gen	regione semi-arida
Asparago	50	30	100	50	230	feb	inverno caldo
	90	30	200	45	365	feb	Mediterraneo
Girasole	25	35	45	25	130	apr/mag	Mediterraneo; California (USA)
Uva	20	40	120	60	240	apr	latitudini basse
	20	50	75	60	205	mar	California (USA)
	20	50	90	20	180	mag	latitudini elevate
	30	60	40	80	210	apr	Latitudini medie (vino)
Luppolo	25	40	80	10	155	apr	Idaho (USA)

In base a queste ed altre informazioni reperibili in rete, agli obiettivi progettuali e ai fondi disponibili, prevediamo di includere nella sperimentazione le specie di seguito elencate:

- **Lattuga (*Lactuca sativa*):** le lattughe sono piante della famiglia delle Composite, molto diffuse negli orti famigliari. Si coltiva come pianta annuale, evitando che vada in seme per raccogliere le foglie quando sono ancora tenere. Data la sua facilità di coltivazione, la lattuga è una coltura che si adatta bene alle condizioni di crescita in serra, incluso i sistemi di coltivazione fuori terra. Il suo KC int è elevato, circa 1 e presenta, in area Mediterranea, un ciclo biologico medio che varia dai 75 ai 140 giorni a seconda della stagionalità.
- **Pomodoro (*Solanum lycopersicum*):** pianta annuale della famiglia delle Solanaceae. Le sue bacche, dal caratteristico colore rosso, sono largamente utilizzate in ambito alimentare in quasi tutti i Paesi del mondo. Nonostante le cultivar rosse siano le più diffuse in commercio, le bacche del pomodoro possono assumere colorazioni differenti. Il pomodoro presenta un KC int elevato di 1,15 e, in area Mediterranea, un ciclo biologico medio di 145 giorni.
- **Sedano (*Apium graveolens*):** è una pianta erbacea della famiglia delle Ombrelliferae coltivata anche a scopo alimentare in tutti gli orti e si presta bene anche alla coltivazione in vaso, può raggiungere gli 80/100 cm di altezza. I fiori sono infiorescenze ombrellifere di colore bianco. Il suo KC int è elevato, circa 1,05 e presenta, in area Mediterranea, un ciclo biologico medio di 125 giorni.
- **Vite (*Vitis vinifera*):** è una specie arbustiva della famiglia delle Vitaceae, è una pianta arborea rampicante che per crescere si attacca a dei sostegni (tutori) mediante i viticci. I frutti sono delle bacche (acini) di forma e colore variabile: gialli, viola o bluastri, raggruppati in grappoli. Caratteristica degli ambienti mediterranei coltivata anche per creare una zona d'ombra. La vite presenta un Kc intorno a 0,8, e un ciclo biologico piuttosto lungo, mediamente superiore ai 200 giorni.

	
<i>a: Lactuca sativa</i> (lattuga)	<i>b: Solanum lycopersicum</i> (pomodoro)
	
<i>c: Apium graveolensis</i> (sedano)	<i>d: Vitis Vinifera</i> (vite da uva)

Figura 26. specie scelte per la sperimentazione

Sulla base dei primi risultati di crescita delle specie scelte (**Figura 26**) si valuterà eventualmente la possibilità di sostituire e/o inserire ulteriori specie o varietà.

4.4.5 Bilance a celle di carico

L'evapotraspirazione verrà misurata mediante un metodo diretto che prevede l'impiego di bilance a celle di carico. Il sistema scelto, **Figura 27**, prevede l'uso di un software che consente di rilevare in continuo il cambiamento di peso della coltura durante le 24 ore. La variazione di peso è in relazione al consumo idrico e alla capacità evapotraspirativa della specie vegetale.

	
Indicatore per bilancia a celle di carico	Piattaforma (60x60 cm) portata 60 Kg (e=5g)

Figura 27. elementi della bilancia a celle di carico

5 Indagini sullo stato dell'arte nelle aree mediterranee circa la capacità di assorbimento dell'acqua meteorica da parte di infrastrutture orizzontali verdi

L'ISPRA riporta che, in Italia, ogni giorno vengono impermeabilizzati 100 ettari di terreni naturali [21]. LUCAS (*Land/use cover frame survey* – il progetto dell'Unione Europea che si occupa di monitorare la copertura e l'utilizzo del suolo) mostra che il 7,3 % del territorio italiano è costituito da superfici artificiali con una percentuale superiore nell'Italia del nord. Secondo ISTAT, le superfici edificate coprono il 6,7% del territorio nazionale. Il fenomeno dell'urbanizzazione se associato al cambiamento climatico, sottolinea una forte necessità di azioni mirate a ridurre il consumo dell'acqua, i.e.: sfruttamento eccessivo dell'acqua potabile per impieghi quotidiani, consumi elevati dell'agricoltura e dell'industria. Inoltre, è necessario avviare una serie di azioni per contenere o rimuovere le principali cause alla base delle alterazioni del ciclo idrologico, soprattutto nelle città. Tra gli interventi di particolare interesse per contenere le perdite di acqua piovana nelle aree urbane, data anche la loro importanza per gli aspetti di sostenibilità ambientale delle stesse aree urbane, si collocano la realizzazione di pavimentazioni permeabili, di bacini di infiltrazione e di drenaggi superficiali, di pozzi perdenti e soprattutto la realizzazione di coperture verdi sugli edifici e nelle adiacenze delle costruzioni, sia di tipo orizzontale (tetti verdi) che verticale (pareti verdi) per limitare la dispersione delle acque meteoriche e per favorire la raccolta dell'acqua piovana [22]. In particolare, per quanto concerne i tetti verdi, numerose evidenze scientifiche associano la capacità di assorbire acqua da parte delle superfici verdi con ricadute positive in termini di diminuzione dei picchi di deflusso delle reti di drenaggio urbano, soprattutto durante eventi meteorici di particolare intensità, ma anche in termini di "re-immissione" in atmosfera dell'acqua di pioggia con i fenomeni di crescita e traspirazione da parte delle piante coltivate (sono valutati mediamente in circa 3-4 mm/m²). La capacità di trattenere l'acqua da parte di una superficie si definisce "capacità di ritenzione idrica" e si esprime con un valore numerico definito "*coefficiente di deflusso* (ψ)", che indica il rapporto tra la quantità di acqua rilasciata (deflusso) e la quantità di acqua captata dalla superficie (pioggia). Tale valore è compreso tra 0 e 1: valori prossimi a 0 indicano una superficie più permeabile, il deflusso è maggiore per valori prossimi a 1 (**Tabella 4** e **Tabella 5**) [23].

Tabella 4. Confronto dei coefficienti di deflusso tra un tetto a coppi e una copertura verde (Fonte: Giacomello, 2012)

	Pioggia = acqua intercettata (l/giorno)	Deflusso tetto in coppi (l/giorno)	Deflusso copertura verde (l/giorno)
Deflusso	150	130	50
Coefficiente di deflusso (ψ)	-----	130/150 = 0,86	50/150 = 0,33

Tabella 5. Coefficienti di deflusso di differenti tipologie di superfici (Fonte: Abram, 2004)

Tipo di superficie	Coefficiente di deflusso (ψ)
Asfalto o piastre con fuga sigillata	0,85 – 0,90
Impianti sportivi in materiale sintetico	0,60
Copertura inclinazione > 3°	0,90 - 1
Copertura inclinazione < 3°	0,80
Copertura piana a verde semi-intensivo con strato colturale 15-25 cm	0,30
Terra, cortile	0,10 – 0,20
Giardino, orto, area verde	0 – 0,10

La copertura a verde comporta una mitigazione dei valori di deflusso delle acque meteoriche in termini di assorbimento e trattenimento che si traducono in un rallentamento dell'afflusso delle acque al sistema dei collettori di raccolta dell'edificio e successivamente sui collettori urbani di raccolta. Tali effetti sono direttamente proporzionali allo spessore dello strato colturale, alla sua capacità di ritenzione e alla massa vegetale presente. In particolare, il rallentamento dell'afflusso delle acque nei collettori è maggiore quanto più spesso è lo strato colturale e quanto più le piogge non raggiungono carattere di particolare intensità. La **Tabella 6** mostra i coefficienti di deflusso rispetto allo spessore della stratificazione e dell'inclinazione della copertura.

Tabella 6 Coefficienti di deflusso.

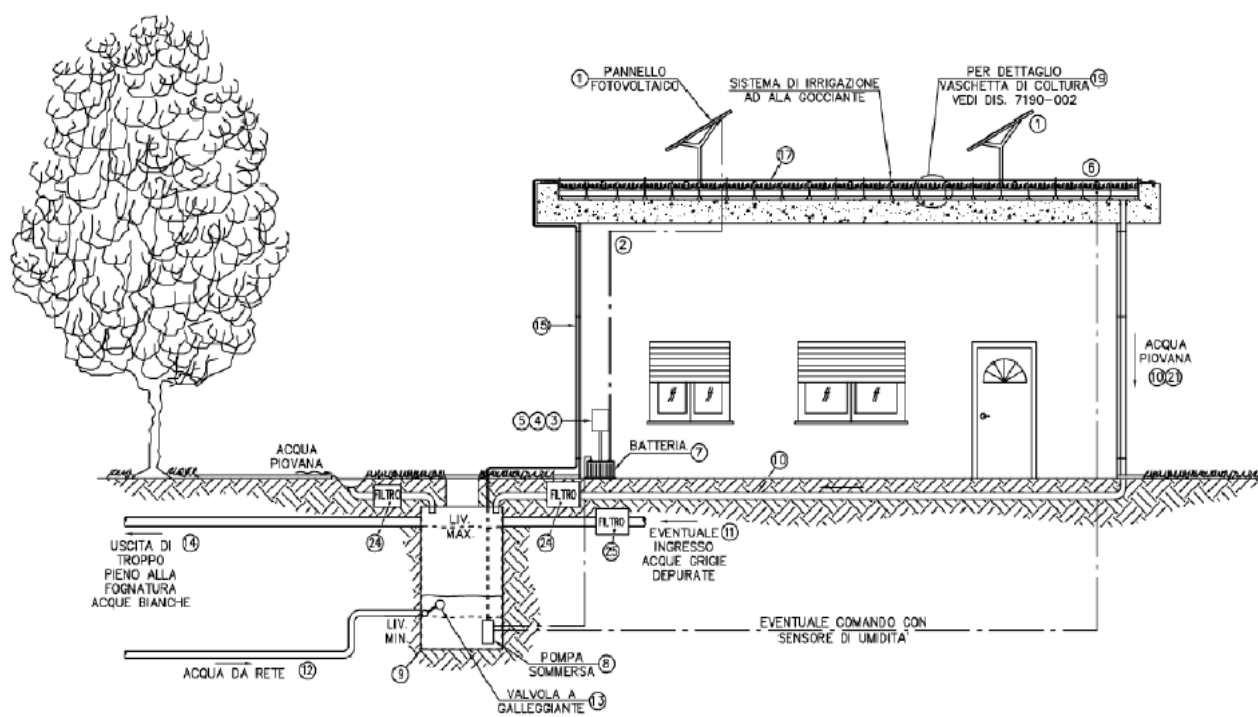
Spessore della stratificazione (S)	Coefficiente di deflusso ψ	
	Inclinazione copertura minore di 15°	Inclinazione copertura maggiore di 15°
[cm]		
8 < S < 15	0,4	0,5
15 < S < 25	0,3	>0,5 ^{*)}
25 < S < 50	0,2	>0,5 ^{*)}
S > 50	0,1	>0,5 ^{*)}
*) Da definirsi di volta in volta in funzione delle tipologie di materiali utilizzati per i vari elementi e strati.		

La capacità di una maggiore regolazione degli afflussi idrici, in relazione alle piogge, dovuta alla copertura verde si traduce, in ultima analisi, in una maggiore *ritenzione idrica*, che rappresenta l'attitudine a trattenere l'acqua sottraendola al deflusso superficiale, e in una maggiore *detenzione idrica*, ossia la capacità di trattenere l'acqua nel breve termine. Entrambi questi effetti contribuiscono alla riduzione dell'altezza dei picchi del deflusso e dei volumi di deflusso [24]. La norma UNI EN 1928 è il riferimento delle coperture a verde per determinare la tenuta all'acqua. A questo proposito, la **Tabella 7** mostra i valori di capacità di una copertura a verde nel contribuire a ripristinare, per quanto possibile, il ciclo dell'acqua naturale.

Tabella 7 Coefficienti di deflusso medi a livello tecnico.

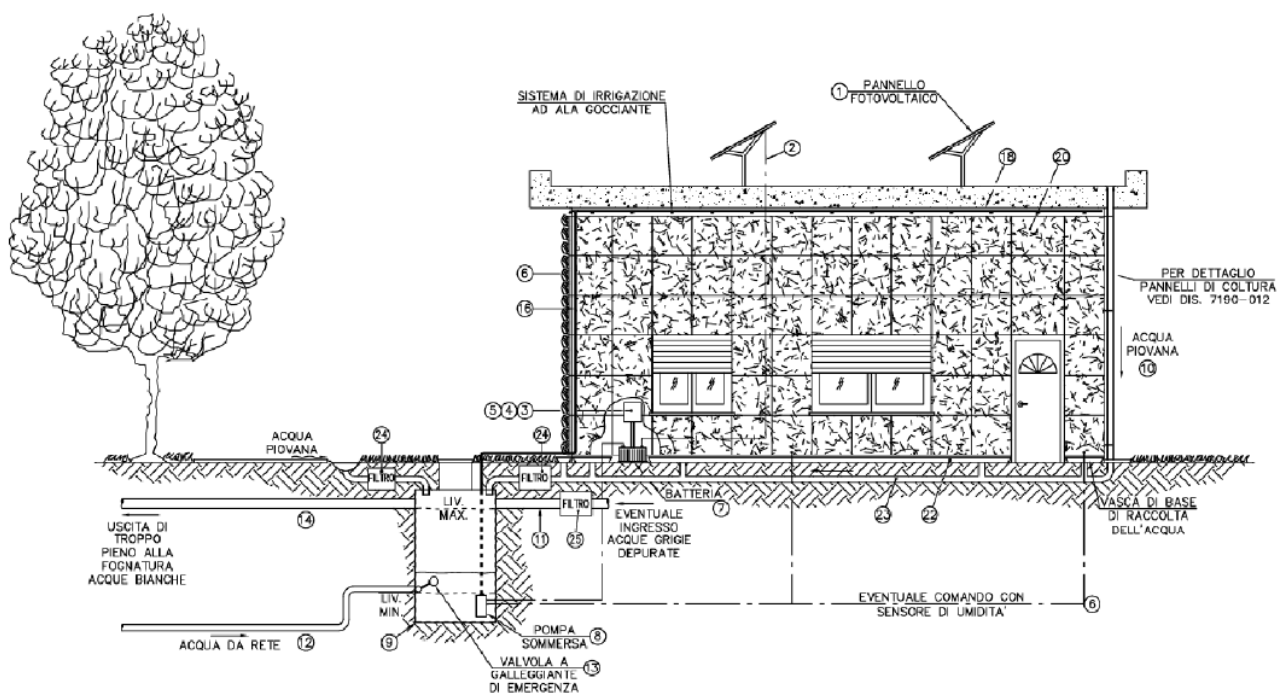
(ψ)	> 0,45	0,45 – 0,36	0,35 – 0,11	<= 0,10
Livello tecnico	4 bassa	3 media	2 buona	1 ottima

Tenuto conto della poca letteratura disponibile per prevedere l'efficienza idraulica di un tetto verde finalizzata a valutare l'efficacia dei tetti verdi come strumento di drenaggio urbano sostenibile (un tetto verde può trattenere il 50-90% delle acque piovane e, in questo modo, ritardare il carico sul tetto e sui sistemi di canalizzazione), secondo ISPRA, in mancanza di una norma italiana specifica per il parametro "coefficiente di deflusso", si può fare riferimento alla norma tedesca DIN 4095. La progettazione di una copertura a verde sia orizzontale (tetto verde) che verticale (parete verde) comporta la realizzazione di un sistema di irrigazione che, per motivi di sostenibilità ambientale della copertura a verde, dovrebbe essere progettato soprattutto in funzione dell'uso della sola acqua piovana o includere il ri-uso delle acque grigie dell'edificio dopo opportuna filtrazione. Data la posizione geografica della nostra penisola, che presenta un clima mediterraneo e submediterraneo, con una stagione secca coincidente con la stagione più calda, è evidente la necessità di un sistema di irrigazione delle essenze vegetali, utilizzate nelle coperture a verde, in grado di sopperire alle limitate precipitazioni naturali, soprattutto nel periodo stagionale primaverile-estivo, in cui è più probabile il verificarsi di un deficit idrico non sufficiente ad assicurare la quantità di acqua necessaria a compensare i consumi dovuti principalmente all'evapotraspirazione. Esempi di schemi idraulici di raccolta e distribuzione di acqua per finalità irrigue di coperture a verde vengono mostrati nelle **Figura 28** e **Figura 29** [25].



N°	DESCRIZIONE	N°	DESCRIZIONE
①	PANNELLO SOLARE DA 200/400 W.P. COMPOSTO DA 1+2 ELEMENTI 1 mt. x 1,6 mt. CADAUNO.	⑭	TROPPO PIENO DI EMERGENZA CON SCARICO A FOGNA.
②	LINEA DI ALIMENTAZIONE A C.C. DAL PANNELLO SOLARE ALLA SCATOLA DI REGOLAZIONE.	⑮	LINEA DI ALIMENTAZIONE ALLA VASCHE.
③	SCATOLA DI REGOLAZIONE E GESTIONE CORRENTE IN ENTRATA/USCITA, POMPA E SENSORI.	⑯	LINEA DI ALIMENTAZIONE AI PANNELLI.
④	TIMER ORARIO DI PARTENZA POMPA.	⑰	ALIMENTAZIONE A GOCCIA ALLE VASCHE.
⑤	COMANDO MANUALE POMPA.	⑱	ALIMENTAZIONE A GOCCIA AI PANNELLI.
⑥	SENSORI DI UMIDITÀ NELLE VASCHE/PANNELLI.	⑲	VASCHE TIPO 500 x 500.
⑦	BATTERIA TIPO AUTO DA 12 VOLT/6 AMPERE/h.	⑳	PANNELLI TIPO 750 x 750.
⑧	POMPA SOMMERSA IN CORRENTE CONTINUA TIPO 120-200 W - ALIMENTAZIONE 12 VOLT.	㉑	LINEA DI RITORNO DAL TETTO PIANO ALLA VASCA DI ACCUMULO.
⑨	VASCA DI ACCUMULO ACQUA - VOLUME 1+2 mc. INTERRATA.	㉒	VASCA DI RACCOLTA ALLA BASE DEI PANNELLI.
⑩	LINEA DI ADDUZIONE ACQUE DI GRONDA.	㉓	LINEA DI SCARICO DALLA VASCA DI RACCOLTA ALLA VASCA INTERRATA.
⑪	LINEA DI ADDUZIONE ACQUE GRIGIE.	㉔	FILTRO ACQUE DI GRONDA.
⑫	LINEA DI ADDUZIONE ACQUA DI RETE.	㉕	FILTRO ACQUE GRIGIE.
⑬	VALVOLA A GALLEGGIANTE DI EMERGENZA.		

Figura 28. Tipologia di sistema idraulico di un tetto verde.



N°	DESCRIZIONE	N°	DESCRIZIONE
①	PANNELLO SOLARE DA 200/400 W.P. COMPOSTO DA 12 ELEMENTI 1 mt x 1.6 mt. CADAUNO.	④	TROCCO PIENO DI EMERGENZA CON SCARICO A FOGNA.
②	LINEA DI ALIMENTAZIONE A C.C. DAL PANNELLO SOLARE ALLA SCATOLA DI REGOLAZIONE.	⑤	LINEA DI ALIMENTAZIONE ALLA VASCHE.
③	SCATOLA DI REGOLAZIONE E GESTIONE CORRENTE IN ENTRATA/USCITA, POMPA E SENSORI.	⑥	LINEA DI ALIMENTAZIONE AI PANNELLI.
④	TIMER ORARIO DI PARTENZA POMPA.	⑦	ALIMENTAZIONE A GOCCIA ALL'E VASCHE.
⑤	COMANDO MANUALE POMPA.	⑧	ALIMENTAZIONE A GOCCIA AI PANNELLI.
⑥	SENSORI DI UMIDITA' NELLE VASCHE/PANNELLI.	⑨	VASCHE TIPO 500 x 500.
⑦	BATTERIA TIPO AUTO DA 12 VOLT/0 AMPERE/LI.	⑩	PANNELLI TIPO 750 x 750.
⑧	POMPA SOMMERSA IN CORRENTE CONTINUA TIPO 120-200 W - ALIMENTAZIONE 12 VOLT.	⑪	LINEA DI RITORNO DAL TETTO PIANO ALLA VASCA DI ACCUMULO.
⑨	VASCA DI ACCUMULO ACQUA - VOLUME 1-2 mc. INTERRATA.	⑫	VASCA DI RACCOLTA ALLA BASE DEI PANNELLI.
⑩	LINEA DI ADDUZIONE ACQUE DI GRONDA.	⑬	LINEA DI SCARICO DALLA VASCA DI RACCOLTA ALLA VASCA INTERRATA.
⑪	LINEA DI ADDUZIONE ACQUE GRIGIE.	⑭	FILTRO ACQUE DI GRONDA
⑫	LINEA DI ADDUZIONE ACQUA DI RETE.	⑮	FILTRO ACQUE GRIGIE
⑬	VALVOLA A GALLEGGIANTE DI EMERGENZA.		

Figura 29 Tipologia di sistema idraulico di una parete verde.

6 Valutazione dell'efficienza ambientale di infrastrutture verdi attraverso tecniche di *Remote Sensing & GIS*

Nelle ultime decadi grazie alla possibilità di osservare grandi porzioni di territorio nelle diverse bande dello spettro elettromagnetico, il telerilevamento satellitare è diventato una delle principali risorse per la raccolta di informazioni sul territorio. I nuovi sensori raccogliendo immagini di grandi aree, anche più di 1000 km² in un unico passaggio con una risoluzione al suolo fino a 30 cm, sono in grado di supportare monitoraggi puntuali, utili per osservare i frequenti cambiamenti nelle aree urbane. Questo significa che l'intera zona amministrativa, una città medio-grande può essere coperta in una mattina e una intera provincia in pochi giorni [26].

La potenza dei prodotti *raster* e vettoriali del telerilevamento (come mappe tematiche, ortofoto o modelli digitali del terreno) sta nella possibilità di essere utilizzati all'interno di un sistema informativo territoriale attraverso i *software* di tipo *GIS* (*Geographic Information System*).

Essi permettono di archiviare le informazioni in dati di tipo geometrico ed alfanumerico, organizzare in strati informativi cioè *layer* a contenuto informativo omogeneo sui quali è possibile agire sui dati mediante operazioni di:

- georeferenziazione (passaggio tra diversi sistemi di coordinate o georeferenziazione di dati che originariamente non lo sono);
- attività di *Query* (interrogazione dei dati dal punto di vista geometrico e geografico, o dal punto di vista degli attributi associati);
- attività di *Overlay* logico o matematico (funzioni che consentono operazioni tra due o più *layer* informativi).

Il Telerilevamento Termico (*Thermal Remote Sensing - TRS*), satellitare e/o aereo, con l'avvento di sensori di sensori ad alta risoluzione spaziale che acquisiscono informazioni nella sottobanda dell'infrarosso termico, permette in particolare di misurare la quantità di radiazione elettromagnetica emessa dalla superficie terrestre nelle lunghezze d'onda che appartengono alla regione dell'infrarosso termico. Il TRS è stato utilizzato per dedurre con sufficiente precisione la temperatura superficiale delle coperture al suolo, *LST* (*Land Surface Temperature*) che a sua volta influenza la temperatura atmosferica [27]

A ciò si aggiunga la enorme disponibilità attuale di dati satellitari *free* (non commerciali) e *open* (liberamente accessibili), disponibili in formato standard, di grande qualità e provenienti da fonti affidabili di informazioni [28].

È noto che i sistemi verdi verticali consentono anche un evidente riduzione delle temperature superficiali delle pareti da essi ricoperti realizzando scarti termici ≥ 10 °C [29]. Alcuni studi hanno affrontato l'esame del profilo di temperatura dell'ambiente esterno ai sistemi verdi, rilevando che viene modificato dalla presenza del sistema di vegetazione verticale fino a 15 cm di distanza [30] [31].

Esistono pertanto sufficienti elementi a favore della possibilità di definire metodologie di *Remote Sensing & GIS* in grado di intercettare e/o prevedere la riduzione di temperatura dell'ambiente circostante i sistemi verdi all'aumentare della distanza da essi.

La prima fase dell'attività di ricerca ha riguardato lo studio dei siti distributori di scene satellitari *free* e di ulteriori *open data* utili al monitoraggio ambientale della/e superficie terrestre in esame.

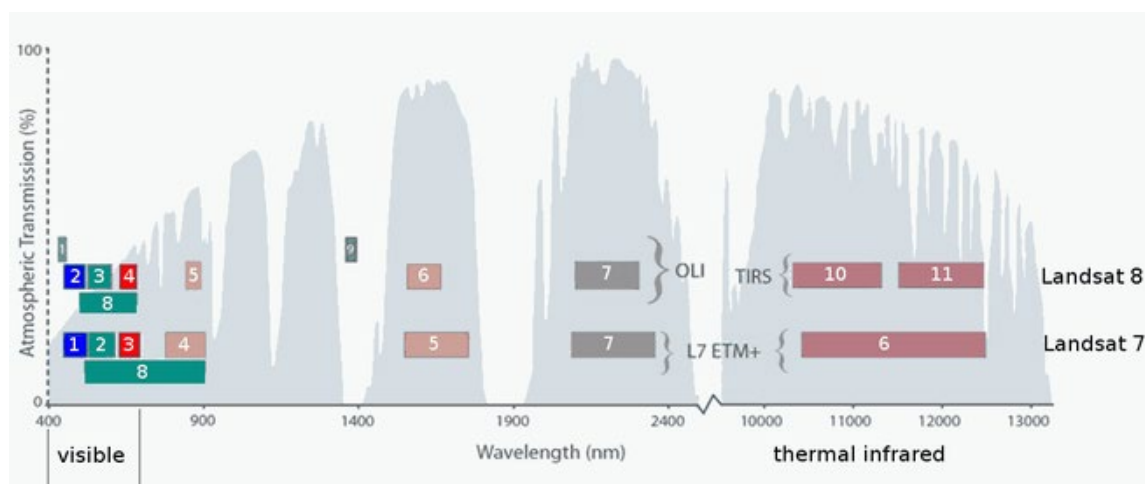
6.1 Il programma Landsat

L' U.S. *Geological Survey* (USGS) ha deciso nel 2008 di aprire l'archivio delle immagini satellitari di *Landsat* raccolte durante gli ultimi quarant'anni, anche per *Landsat 9*, che sarà lanciato a fine 2020. Il progetto *Landsat* è stato tra le prime fonti di immagini multispettrali a media risoluzione con copertura globale. Maggiore è il numero di bande, maggiore è la possibilità di riconoscere differenze nella riflettanza.

Dati multispettrali Landsat (6)

Sensore	Satellite	Banda	λ μm	Risoluzione spaziale (m)
Multispectral Scanner (MSS)	Landsat 1 (1972-1978) Landsat 2 (1975-1982) Landsat 3 (1978-1983) Landsat 4 (1982-1993) Landsat 5 (1984-2013)	1 (verde)	0,50-0,60	80
		2(rosso)	0,60-0,70	80
		3	0,70-0,80	80
		4	0,80-1,10	80
Thematic Mapper (TM)	Landsat 4 (1982-1993) Landsat 5 (1984-2011)	1 (blu)	0,45-0,52	30
		2 (verde)	0,52-0,60	30
		3(rosso)	0,63-0,69	30
		4	0,76-0,90	30
		5	1,55-1,75	30
		6 (termico)	10,40-12,50	120
		7	2,08-2,35	30
Enhanced Thematic Mapper (ETM+)	Landsat 7 (1999-...)	1 (blu)	0,45-0,52	30
		2 (verde)	0,52-0,60	30
		3(rosso)	0,63-0,69	30
		4	0,77-0,90	30
		5	1,55-1,75	30
		6 (termico)	10,40-12,50	60
		7	2,09-2,35	30
		8 (PAN.)	0,52-0,90	15
Operational Land Imager (OLI)	Landsat 8 (2013-...)	1	0,43-0,45	30
		2 (blu)	0,45-0,51	30
		3 (verde)	0,53-0,59	30
		4(rosso)	0,64-0,67	30
		5	0,85-0,88	30
		6	1,57-1,65	30
		7	2,11-2,29	30
		9	1,36-1,38	30
		8 (PAN.)	0,50-0,68	15
Thermal Infrared Sensor (TIR)	Landsat 8 (2013-...)	10 (termico)	10,60-11,19	100
		11 (termico)	11,50-12,51	100

Nel 2013 infine è stato lanciato il satellite *Landsat 8* con i sensori OLI, in grado di acquisire una ulteriore banda prima del blu (per lo studio degli ambienti lacustri e costieri) ed una banda 9 per lo studio della nuvolosità, e TIR con due bande nell'infrarosso termico.



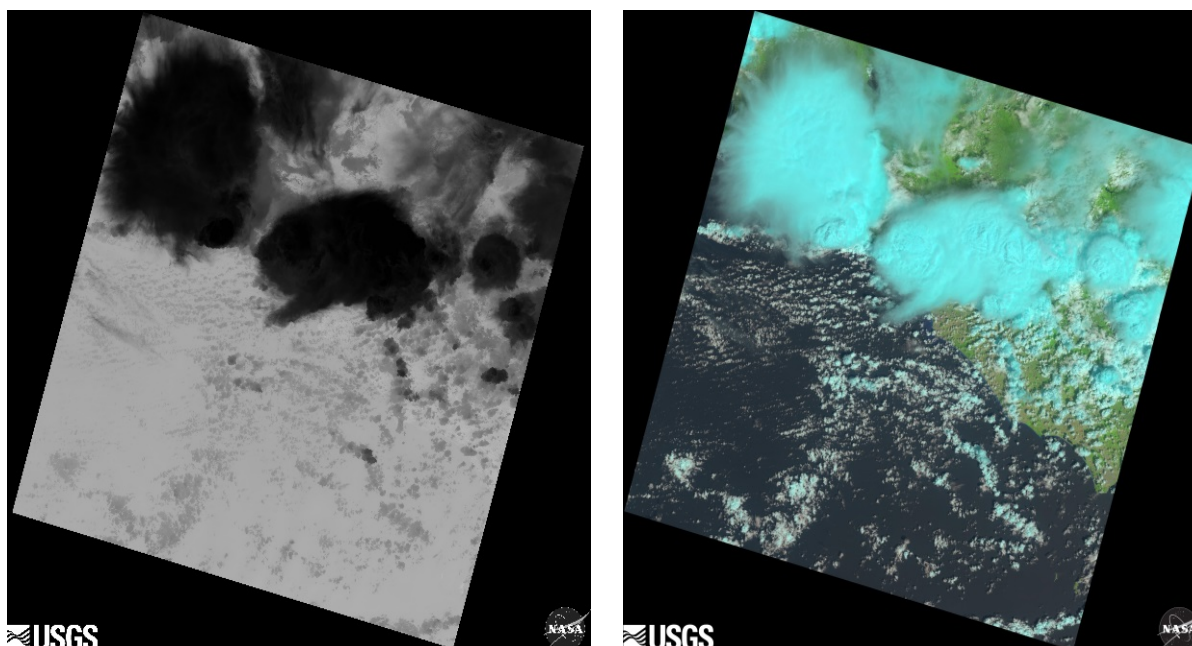
Per la ricerca e download di immagini *Landsat* tra i siti disponibili:

<http://glovis.usgs.gov/>
<http://earthexplorer.usgs.gov/>
<http://landsat.org/ortho/index.php>
<http://glcfapp.glcf.umd.edu:8080/esdi/>

Glovis, [32], permette di accedere ad un archivio di scene molto ampio con anche gli ultimi dati Landsat8; per scaricare i dati disponibili occorre registrarsi, ma è gratuito.

Consente di specificare il satellite di acquisizione, il mese e l'anno di acquisizione (per i dati *Landsat* 8 in genere sono presenti 1 o 2 immagini al mese); inquadrata la scena che copre l'area di nostro interesse si procede al *download* sul proprio *account*. Diversi tipi di *files* corrispondenti a immagini in colori veri, in termico, di alta qualità con riferimenti geografici, file di metadati.

Di seguito esempi della stessa scena in diverse bande di acquisizione (termico a sinistra, veri colori a destra) cercata con le coordinate geografiche del Centro ENEA CASACCIA.



Stessa scena satellitare in diverse bande di acquisizione (termico a sinistra, veri colori a destra)

Timeline View 2019-07-27 at 19:00:00



Sito di riferimento. Coordinate geografiche: Longitudine 12.3019444; Latitudine 42.0402778

6.2 Copernicus, il programma europeo di osservazione della terra

Copernicus è il programma europeo per la raccolta di informazioni ambientali attraverso dati di osservazione della Terra, in precedenza denominato *GMES (Global monitoring for Environment and Security)* mira a fornire informazioni agli stati membri dell'UE sullo stato dell'ambiente, integrando diverse fonti di dati, da remoto e *in situ*.

Copernicus è costituito da una costellazione di satelliti chiamati *Sentinel*: ogni missione Sentinel si basa su una costellazione di due satelliti per soddisfare i requisiti di rivisitazione e copertura. Ad oggi sono state realizzate 30 missioni per corredare di una gamma di tecnologie, come strumenti radar e multispettrali per la visualizzazione della crosta terrestre, degli oceani e dell'atmosfera. più'

Sei sono i temi principali coperti dal programma *Copernicus*: *terra, acqua, atmosfera, cambiamenti climatici, emergenza e sicurezza* [33].

Infrastruttura di Copernicus



~30

Contributing missions
from National, European
or International organisations

Oltre ai dati provenienti dai *Sentinel*, il programma *Copernicus* offre i cosiddetti "*Core Services*", cioè prodotti a valore aggiunto geografico o mappe tematiche su territorio, mare, atmosfera, cambiamenti climatici, gestione delle emergenze e sicurezza.

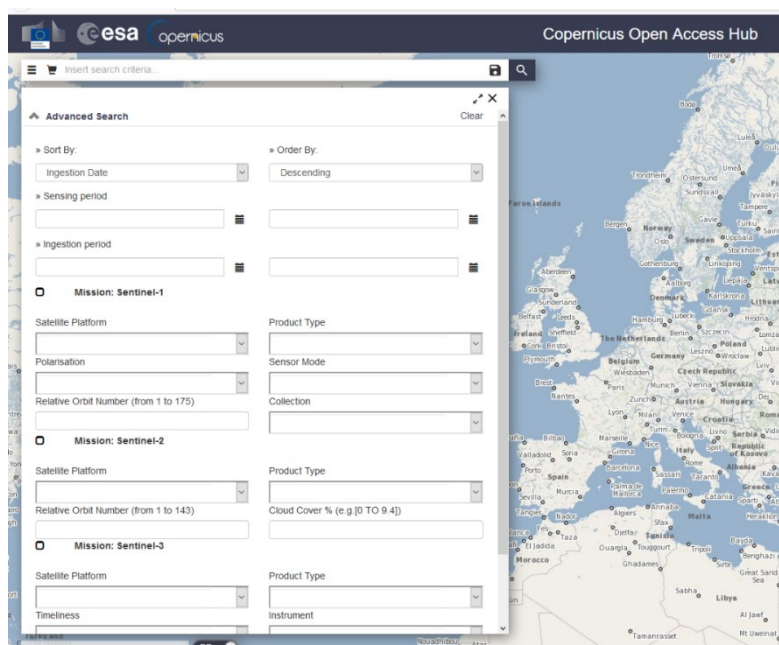
Gli utenti di *Copernicus* sono gli enti pubblici e i progettisti che si occupano delle leggi per la protezione dell'ambiente o che agiscono in caso di emergenza, ma anche i cittadini privati, le imprese e le industrie, che possono trarne vantaggio. L'Agenzia Spaziale Europea è responsabile delle infrastrutture per la componente spaziale e per l'Agenzia Europea dell'Ambiente, con la cooperazione degli Stati membri, è responsabile della componente *in situ*.

Esistono cinque piattaforme *cloud* per l'accesso centralizzato ai dati e alle informazioni di *Copernicus* e agli strumenti per la loro elaborazione elettronica: *DIAS*, ovvero *Data and Information Access Services* (servizi di accesso a dati e informazioni).

Le cinque piattaforme *online DIAS* consentono agli utenti di scoprire, utilizzare, elaborare e scaricare dati e informazioni di *Copernicus*. Tutte le piattaforme *DIAS* permettono l'accesso ai dati dei satelliti *Sentinel* di *Copernicus*, a tutti i prodotti informativi dei sei servizi operativi di *Copernicus* e a strumenti *cloud* (*open source* e/o a pagamento in base all'utilizzo effettivo), eliminando la necessità di scaricare file molto pesanti da diversi punti di accesso ed elaborarli in locale. I dati sono stati scaricati gratuitamente dagli appositi server di ESA e sono disponibili all'indirizzo <https://scihub.copernicus.eu> il quale si presenta con l'interfaccia grafica *Scihub* (11).

In questo portale è possibile selezionare l'area di interesse e svolgere una ricerca avanzata grazie alla finestra sulla sinistra dello schermo dalla quale è possibile scegliere la missione, il livello di pre-trattamento del dato, modalità e periodo di acquisizione, polarizzazione (S1) e copertura nuvolosa (S2). Le immagini selezionate sono in proiezione *UTM* e *Datum WGS84*.

Stessa scena satellitare in diverse bande di acquisizione (veri colori a sinistra, termico a destra)



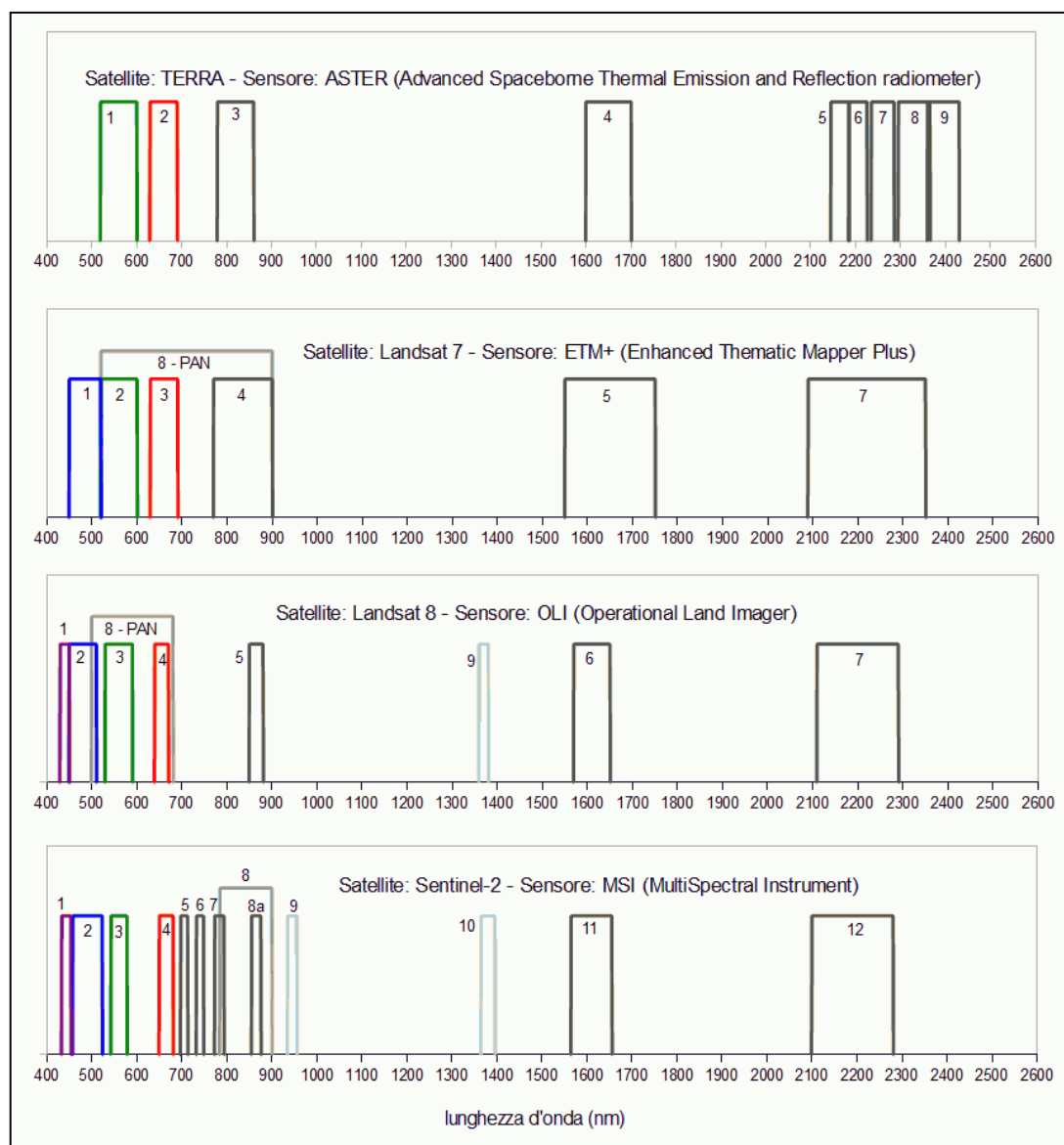
Timeline View 2019-07-20

6.3 Ulteriori Satelliti utilizzati di frequente in studi di remote sensing applicato all'atmosfera

L'*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER)*: uno dei cinque sensori remoti che si trovano a bordo del satellite multinazionale (USA- Giappone) per telerilevamento *Terra* (EOS AM-1). Il satellite assieme ad *Acqua* (EOS PM) fa parte del programma Earth Observing System (EOS) ed è stato posto in orbita geostazionaria, dalla NASA, nel 1999. Il sensore *ASTER* è attivo dal febbraio 2000. *ASTER* fornisce immagini ad alta risoluzione della Terra in quattordici lunghezze d'onda diverse, luce visibile-infrarosso. La

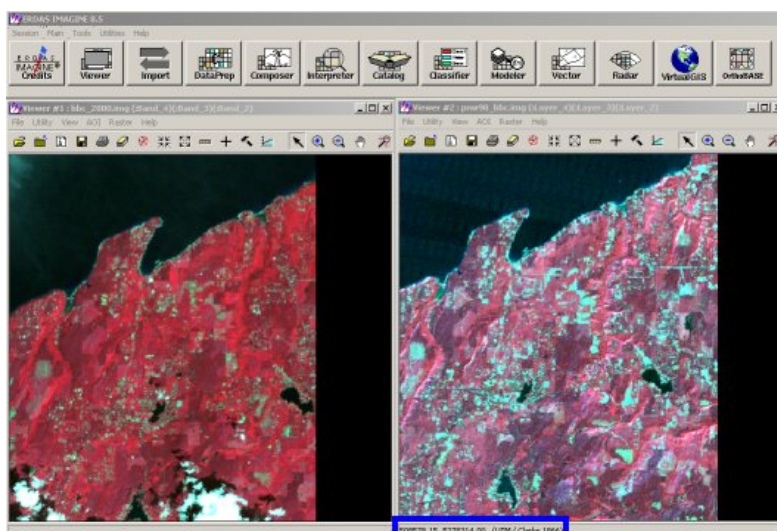
risoluzione angolare (minimo angolo che un sistema ottico è in grado di distinguere, senza che il fenomeno della diffrazione confonda l'immagine) delle immagini è compresa tra 15 e 90 metri. I dati del sensore permettono la creazione di dettagliate mappe della temperatura, emissività, riflettanza ed elevazione della superficie terrestre [34].

MODIS (*Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer*) un altro dei sensori a bordo di *Terra* e *Acqua*: raccoglie dati in 36 bande spettrali, compresi tra 0,4 μm e 14,4 μm di lunghezza d'onda, e con ampia risoluzione spaziale (due bande a 250 m, cinque a 500 m e ventinove bande alla risoluzione di 1 km). Insieme, i due strumenti mappano l'intero pianeta in uno o due giorni e sono stati progettati per raccogliere informazioni sulle dinamiche globali di larga scala, tra le quali: i cambiamenti nella copertura nuvolosa della Terra, il bilancio dell'energia radiante ricevuta ed emessa dal nostro pianeta, i processi che hanno luogo negli oceani, sui continenti e nella bassa atmosfera [35].



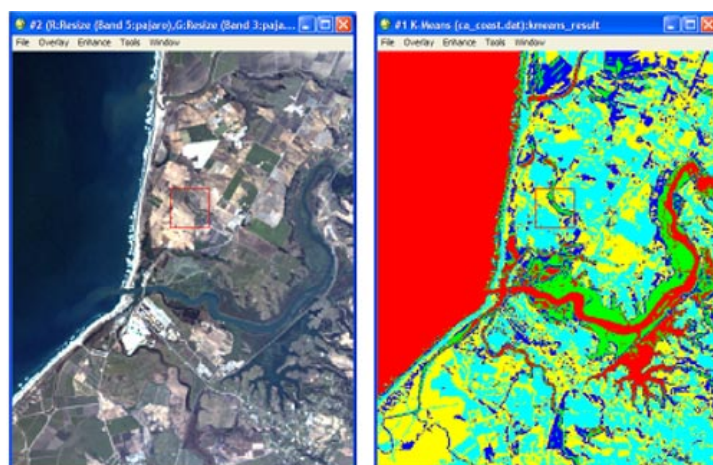
Confronto delle caratteristiche spettrali di ASTER, Landsat (7 e 8) e Sentinel-2

La fusione delle immagini è un processo di fusione o combinazione di due immagini insieme. Nella fusione di immagini, *ERDAS* può facilmente combinare due pezzi di immagini geografiche di dimensioni diverse. *ENVI* regola la risoluzione di un'immagine secondo l'altra prima di eseguire l'algoritmo di fusione. Da questo punto di vista, *ERDAS* è più semplice, più veloce ed efficiente di *ENVI*.



Correzione geometrica

Il modello di progettazione nella funzione di correzione della geometria nel software *ERDAS* ed *ENVI* è simile, ma il numero di punti necessari per l'accurato metodo di correzione geometrica polinomiale è diverso. Per eseguire un'accurata correzione della geometria polinomiale in *ERDAS*, solo sei punti corrispondenti sono almeno necessari in, mentre *ENVI* prende almeno nove punti corrispondenti, il che indica che *ENVI* è più sofisticato in questo senso.



Mappatura tematica

Quando si tratta di mappatura tematica, *ENVI* è superiore. *ENVI* ha strumenti di mappatura rapida, può aggiungere griglie, una scala una volta per tutte, il che è conveniente per tutti. D'altra parte, *ERDAS* utilizza il "metodo *scattered point*", che richiede di aggiungere più volte la scala. Quindi, possiamo concludere che *ENVI* è un software migliore per il rilevamento di strade e aree urbane.

In conclusione, possiamo dire che *ERDAS* è più adatto per l'elaborazione della geometria, mentre *ENVI* è più adatto per l'analisi spettrale.

Le immagini scaricate dai server di *ESA*, soprattutto l'immagine *SAR* (*Synthetic Aperture Radar*, che a differenza dei sensori ottici ha la capacità di osservare oggetti attraverso le nuvole e, anche se solo parzialmente, attraverso le precipitazioni), non sono utilizzabili direttamente per la classificazione in *ENVI*. Per questo è necessario che vengano eseguite alcune operazioni di *pre-processing* delle immagini tramite il software *SNAP*

SNAP è un software prodotto e distribuito gratuitamente da *ESA*, nasce con l'intento specifico di trattare le immagini provenienti dalle piattaforme *Sentinel*. Il software è in grado di leggere numerosi formati di file sia *Radar* che ottici dando la possibilità di indicare da che piattaforma satellitare provengono i dati che si stanno aprendo.

7 INCENTIVI PER GLI EDIFICI VERDI

L'Unione Europea, per contrastare il cambiamento climatico mantenendo tuttavia la sicurezza energetica e la qualità ambientale delle città e del territorio, ha sottolineato la necessità entro il 2030 di raggiungere gli obiettivi quali: il miglioramento dell'efficienza energetica di almeno il 27%, il raggiungimento del 27% di quota di energia rinnovabile consumata, il taglio delle emissioni di gas serra nella direzione di raggiungere il livello di abbattimento dell'80% a livello nazionale entro il 2050. Infatti, a causa dei mutamenti climatici, che sempre più spesso caratterizzano l'area mediterranea, dove ricade una buona parte del territorio italiano, il condizionamento estivo degli ambienti rappresenta una quota consistente del consumo di energia annuale degli edifici. In particolare, nell'Unione Europea il 40% dell'energia finale per il riscaldamento e il raffreddamento è consumata nel settore residenziale, il 37% nell'industria e il 18% nei servizi, con l'energia elettrica per la climatizzazione estiva che rappresenta ormai il 30% dei consumi complessivi nelle diverse tipologie di edifici (pubblici, residenziali e commerciali (*COM(2016) 51 final*)). Per contenere i consumi energetici degli edifici, l'UE ha emanato la *Direttiva 2010/31/UE*, che ha previsto gli edifici costruiti dopo il 31 dicembre 2020, il livello di energia "quasi zero" (le pubbliche amministrazioni già dal 2018 dovranno attenersi a tale direttiva). Successivamente, con la *Direttiva 2012/27/UE* sull'efficienza energetica, recepita dall'Italia con il *Decreto legislativo 4 luglio 2014*, l'Unione Europea (UE), ha stabilito un quadro comune di misure per una strategia a lungo termine per la ristrutturazione degli edifici residenziali e commerciali, sia pubblici che privati, sotto il denominatore dell'efficienza energetica. Tra le misure considerate, l'impiego dei sistemi vegetali per aumentare l'efficienza energetica rispetto alla riduzione dei consumi di riscaldamento e di raffreddamento, come sottolineato dalla *COM(2013) 249 final "Infrastrutture verdi-Rafforzare il capitale naturale in Europa"* e dalla nuova *Direttiva Efficienza Energetica» (UE) 2018/844*, entrambe favorevoli allo sviluppo di soluzioni naturali (*Nature Based Solution*) per sostenere la rigenerazione urbana, la resilienza e il miglioramento dell'efficienza energetica delle città, la diminuzione delle emissioni di gas a effetto serra delle aree urbane e dei territori europei (*European Commission, Towards an EU Research and Innovation policy agenda for Nature-Based Solutions & Re-Naturing Cities, 2015*). L'impiego di sistemi vegetali, infine, si colloca all'interno degli obiettivi previsti dal Patto dei Sindaci del 2008 (The Covenant of Mayors) e tra quelli del Global Covenant of Mayors for Climate and Energy del 2017. Lo sviluppo di linee guida per migliorare l'efficienza energetica degli edifici attraverso la realizzazione di coltri vegetali disposte in orizzontale e/o in verticale sugli edifici rappresenta uno degli obiettivi prioritari del progetto in corso presso il Centro Ricerche Casaccia, sviluppato dal Dipartimento Unità Efficienza Energetica (DUEE) dell'ENEA, con l'obiettivo di contribuire alla definizione di parametri tecnici per la progettazione di edifici "future proof" - a prova di futuro - in linea con il position paper dell'*Alliance to Save Energy "Energy Efficiency: A Tool for Climate Change Adaptation"* ma anche utili per integrare la normativa italiana UNI 11235/2015, che riporta le "Istruzioni per la progettazione, l'esecuzione, il controllo e la manutenzione di coperture a verde".

7.1 Ecobonus per il verde sugli edifici

L'integrazione del tetto verde nell'involucro edilizio consente l'incremento dell'efficienza energetica dell'edificio sia nei periodi invernali che estivi, attraverso la schermatura alla radiazione solare e i fenomeni della fotosintesi e della evapo-traspirazione che caratterizzano l'accrescimento vegetale. Il D.M. 19 febbraio 2007, il cosiddetto "Decreto edifici", che regola le detrazioni fiscali del 65% per il risparmio energetico degli edifici esistenti, all'Art.1 Comma 3 definisce così gli interventi agevolabili ai sensi del comma 345: "*Per interventi sull'involucro di edifici esistenti di cui all'articolo 1, comma 345, della legge finanziaria 2007, si intendono.....gli interventi su edifici esistenti, parti di edifici esistenti o unità immobiliari esistenti, riguardanti strutture opache verticali, strutture opache orizzontali (coperture e pavimenti), finestre comprensive di infissi, delimitanti il volume riscaldato verso l'esterno e verso vani non riscaldati, che rispettano i requisiti di trasmittanza termica U, espressa in W/m^2K , definiti dal decreto del Ministro dello sviluppo Economico 11 marzo 2008, pubblicato sulla Gazzetta Ufficiale n. 66 del 18 marzo 2008*. Anche la realizzazione di un tetto verde, nel rispetto dei requisiti richiesti, è inclusa tra gli interventi. Secondo la definizione del DPR 59/2009:

“Coperture a verde, si intendono le coperture continue dotate di un sistema che utilizza specie vegetali in grado di adattarsi e svilupparsi nelle condizioni ambientali caratteristiche della copertura di un edificio. A tal proposito, la Tabella 8 Trasmissioni (A, B, C, D) dall’Allegato 1, Appendice B al Decreto del 26 giugno 2015, riportano i valori limite di trasmissione massimi nel caso di interventi che prevedano l’isolamento termico dall’esterno, da rispettare ai fini dell’ammissibilità alle detrazioni del 65%. In caso di interventi di riqualificazione energetica dell’involucro opaco che prevedano l’isolamento termico dall’interno o l’isolamento termico in intercapedine, indipendentemente dall’entità della superficie coinvolta, i valori delle trasmissioni di cui alle Tabelle da 1 a 4 dell’Appendice B, sono invece incrementati del 30%.

Tabella 8. Trasmissioni (A, B, C, D)

Zona climatica	U (W/m ² K)		
	2015 ⁽¹⁾	2021 ⁽²⁾	
A e B	0,45	0,40	A - Trasmissione termica U massima delle strutture opache verticali, verso l'esterno soggette a riqualificazione.
C	0,40	0,36	
D	0,36	0,32	
E	0,30	0,28	
F	0,28	0,26	
Zona climatica	U (W/m ² K)		
	2015 ⁽¹⁾	2021 ⁽²⁾	
A e B	0,34	0,32	B - Trasmissione termica U massima delle strutture opache orizzontali o inclinate di copertura, verso l'esterno soggette a riqualificazione
C	0,34	0,32	
D	0,28	0,26	
E	0,26	0,24	
F	0,24	0,22	
Zona climatica	U (W/m ² K)		
	2015 ⁽¹⁾	2021 ⁽²⁾	
A e B	0,48	0,42	C - Trasmissione termica U massima delle strutture opache orizzontali di pavimento, verso l'esterno soggette a riqualificazione
C	0,42	0,38	
D	0,36	0,32	
E	0,31	0,29	
F	0,30	0,28	
Zona climatica	U (W/m ² K)		
	2015 ⁽¹⁾	2021 ⁽²⁾	
A e B	3,20	3,00	D - Trasmissione termica U massima delle chiusure tecniche trasparenti e opache e dei cassonetti, comprensivi degli infissi, verso l'esterno e verso ambienti non climatizzati soggette a riqualificazione
C	2,40	2,00	
D	2,10	1,80	
E	1,90	1,40	
F	1,70	1,00	

Riguardo alle modalità di calcolo della trasmissione dello strato culturale, la norma UNI 11235/07 aggiornata nel 2015 “Istruzioni per la progettazione, l’esecuzione, il controllo e la manutenzione di coperture a verde” non fornisce però indicazioni sulle modalità di calcolo della trasmissione del terreno. Pertanto, il suggerimento del CTI (Comitato Termotecnico Italiano) è quello di utilizzare la classica UNI EN ISO 6946: 2018 “Componenti ed elementi per edilizia - Resistenza termica e trasmissione termica - Metodi di calcolo” ipotizzando che il terreno sia uno strato facente parte della stratigrafia della struttura (solaio/parete). Per i valori di trasmissione termica del “sistema verde”, il riferimento normativo si deve riferire prioritariamente alla stratigrafia che sostiene la copertura verde. In generale, il riferimento normativo è la UNI EN 13370: 2018 “Prestazione termica degli edifici - Trasferimento di calore attraverso il terreno - Metodi di calcolo”.

7.2 Conto termico

Il Conto Termico 2019 (il cosiddetto Conto Termico 2.0) è un fondo che incentiva gli interventi mirati a migliorare l'efficienza energetica e lo sviluppo delle rinnovabili termiche per interventi mirati al miglioramento dell'efficienza energetica di edifici e abitazioni. Il fondo è gestito dal GSE (Gestore Servizi Energetici), che si occupa di stabilire quali sono gli interventi ammessi, chi può accedere agli incentivi e quali sono le modalità di accesso, naturalmente sulla base della normativa vigente decisa dal legislatore. Per quanto riguarda il tetto verde, le regole applicative del D.M. del 16 febbraio 2016, al paragrafo 5.1 "Isolamento termico di superfici opache delimitanti il volume climatizzato (intervento 1.A - art. 4, comma 1, lettera a)" riportano: l'intervento incentivabile consiste nell'isolamento di coperture, pavimenti/solai e pareti perimetrali di edifici esistenti, parti di edifici esistenti o unità immobiliari esistenti di qualsiasi categoria catastale, dotati di impianto di climatizzazione (Tabella 9).

Tabella 9. Strutture opache: valori necessari per il calcolo dell'incentivo

[Tabella 5 – Allegato II - DM 16.02.16]			
Tipologia di intervento	Percentuale incentivata della spesa ammissibile (% _{spesa})	Costo massimo ammissibile (C _{max})	Valore massimo dell'incentivo (I _{max}) [€]
i. Strutture opache orizzontali ¹³ : isolamento coperture			(i+ii+iii) ≤ 400.000
Esterno	40 (*) (**)	200 €/m ²	
Interno	40 (*) (**)	100 €/m ²	
Copertura ventilata	40 (*) (**)	250 €/m ²	
ii. Strutture opache orizzontali: isolamento pavimenti			
Esterno	40 (*) (**)	120 €/m ²	
Interno	40 (*) (**)	100 €/m ²	
iii. Strutture opache verticali: isolamento pareti perimetrali			
Esterno	40 (*) (**)	100 €/m ²	
Interno	40 (*) (**)	80 €/m ²	
Parete ventilata	40 (*) (**)	150 €/m ²	

(*) Per interventi realizzati nelle zone climatiche E e F la percentuale incentivata della spesa ammissibile è pari al 50%.

(**) Per interventi che prevedano, oltre all'isolamento termico delle superfici opache, almeno un intervento, a scelta, tra le tipologie 1.C, 2.A, 2.B, 2.C, 2.E, la percentuale incentivata della spesa ammissibile è pari al 55%.

[I totale = 55% delle spese per l'isolamento termico + (a scelta) 55% delle spese per il generatore a condensazione, oppure, + il contributo secondo lo specifico algoritmo per uno degli interventi di categoria 2].

I soggetti che possono richiedere l'incentivo sono le Pubbliche Amministrazioni direttamente o indirettamente tramite una ESCo, sugli edifici di proprietà della PA. Ai fini dell'accesso agli incentivi del conto termico, nel caso di interventi che prevedano l'isolamento dall'esterno, per ogni tipologia di superficie opaca (copertura, pavimento o parete), è definito un valore limite massimo di trasmittanza, in funzione della zona climatica come specificato nella Tabella 10.

Tabella 10 Valori di trasmittanza riportati dalle regole applicative del GSE

[Tabella 1 – Allegato I – DM 16.02.16]		
Tipologia di intervento	Requisiti tecnici di soglia per la tecnologia	
Strutture opache orizzontali: isolamento coperture	Zona climatica A	$\leq 0,27 \text{ W/m}^2\text{K}$
	Zona climatica B	$\leq 0,27 \text{ W/m}^2\text{K}$
	Zona climatica C	$\leq 0,27 \text{ W/m}^2\text{K}$
	Zona climatica D	$\leq 0,22 \text{ W/m}^2\text{K}$
	Zona climatica E	$\leq 0,20 \text{ W/m}^2\text{K}$
	Zona climatica F	$\leq 0,19 \text{ W/m}^2\text{K}$
Strutture opache orizzontali: isolamento pavimenti	Zona climatica A	$\leq 0,43 \text{ W/m}^2\text{K}$
	Zona climatica B	$\leq 0,40 \text{ W/m}^2\text{K}$
	Zona climatica C	$\leq 0,30 \text{ W/m}^2\text{K}$
	Zona climatica D	$\leq 0,28 \text{ W/m}^2\text{K}$
	Zona climatica E	$\leq 0,25 \text{ W/m}^2\text{K}$
	Zona climatica F	$\leq 0,23 \text{ W/m}^2\text{K}$
Strutture opache verticali: isolamento pareti perimetrali	Zona climatica A	$\leq 0,38 \text{ W/m}^2\text{K}$
	Zona climatica B	$\leq 0,38 \text{ W/m}^2\text{K}$
	Zona climatica C	$\leq 0,30 \text{ W/m}^2\text{K}$
	Zona climatica D	$\leq 0,26 \text{ W/m}^2\text{K}$
	Zona climatica E	$\leq 0,23 \text{ W/m}^2\text{K}$
	Zona climatica F	$\leq 0,22 \text{ W/m}^2\text{K}$

Laddove gli interventi prevedano l'isolamento termico dall'interno o l'isolamento termico in intercapedine, i valori di trasmittanza massimi di cui alla Tabella sopra riportata devono essere incrementati del 15%, comunque nel rispetto di quanto previsto dal decreto del 26 giugno 2015 concernente le metodologie di calcolo della prestazione energetica e definizione delle prescrizioni e dei requisiti minimi degli edifici.

7.3 Serra Bioclimatica

La serra bioclimatica beneficia degli interventi agevolabili con le detrazioni fiscali del 50% previste per le ristrutturazioni edilizie, il cosiddetto Bonus casa (Art. 16 bis del DPR 917/86) ma non delle detrazioni fiscali per la riqualificazione energetica del patrimonio edilizio esistente, il cosiddetto Ecobonus (ex legge 296/2006). Le relative informazioni sono disponibili al sito <https://detrazionifiscali.enea.it/>. Ulteriori dettagli sugli ecobonus, inoltre, sono consultabili ai seguenti link:

- <https://www.energiaenergetica.enea.it/detrazionifiscali/ecobonus/vademecum/schermature-solari.html>
- <https://www.energiaenergetica.enea.it/detrazionifiscali/ecobonus/vademecum/serramenti-e-infissi.html>

7.4 Bonus verde

La Legge di Bilancio 2020 ha riconfermato la detrazione Irpef pari al 36% per spese sostenute per interventi di "sistemazione a verde" di aree scoperte private di edifici esistenti, unità immobiliari singole o condomini, pertinenze o recinzioni, impianti di irrigazione e costruzione di pozzi, e realizzazioni di coperture a verde e giardini pensili. Tra le spese incentivabili rientrano anche quelle relative a "progettazione e manutenzione" dei lavori. La detrazione si applica su un importo massimo di spesa di 5.000 euro per unità immobiliare, sostenuta ed effettivamente rimasta a carico dei contribuenti che possiedono o detengono, sulla base di un titolo idoneo, l'immobile sul quale vengono effettuati gli interventi verdi.

Secondo la Legge di Bilancio 2019, le regole per usufruire del Bonus Verde sono le seguenti:

- Sono riconosciute le spese sostenute dai contribuenti che detengono l'immobile sul quale sono effettuati gli interventi riguardanti aree scoperte private di edifici esistenti, unità immobiliari, pertinenze o recinzioni, impianti di irrigazione e di pozzi sia privati che condominiali.
- È riconosciuta la detrazione anche per le spese relative ad interventi su parti comuni esterne di edifici condominiali fino ad un massimo di euro 5.000 per unità abitativa. In questo caso, la detrazione spetta al singolo condomino nel limite della quota a lui imputabile a condizione che la stessa sia stata effettivamente versata al condominio entro i termini di presentazione della dichiarazione dei redditi.
- Per usufruire della detrazione, ripartita in dieci quote annuali di pari importo, le spese devono essere effettuate con mezzi di pagamento tracciabili.
- Sono ricomprese nell'agevolazione le spese di progettazione e manutenzione connesse all'esecuzione degli interventi indicati.

8 Conclusioni

Il ruolo del verde si configura ormai un elemento di estremo interesse per il settore dell'edilizia e, più in generale, per la sostenibilità energetica ed ambientale degli edifici, delle città e dei territori. I sistemi vegetali costituiscono un elemento vivo e dinamico, che si sottrae alle regole di un'analisi prestazionale pensata e normalizzata per involucri tradizionali. Le diverse prestazioni di un sistema verde dipendono principalmente dalle essenze vegetali utilizzate, dalle condizioni climatico-ambientali, dalle proprietà termo-fisiche dei materiali di costruzione. Il vantaggio in termini di isolamento termico del tetto verde rispetto a una soluzione priva di vegetazione è dovuto principalmente alle caratteristiche della stratigrafia che sostiene il "sistema substrato vegetativo". Da sottolineare che la riduzione della trasmittanza termica associata ai sistemi verdi, ai fini dell'ecobonus 65%, si deve riferire soprattutto alle caratteristiche della stratigrafia che sostiene il sistema verde nel caso della copertura orizzontale e della struttura verticale disposta sulle facciate dell'edificio in funzione di sostegno del sistema di copertura verde parietale. L'impiego di sistemi vegetali consente l'accesso allo strumento "bonus verde" che prevede la detrazione del 36% su una spesa totale di 5.000 € per i sistemi vegetali.

Le attività svolte durante il primo anno di ricerca hanno consentito di approfondire la conoscenza sulle specie vegetali con capacità elevata di evapotraspirazione e sugli effetti del verde parietale sui valori della concentrazione di CO₂ nell'aria circostante. I risultati di queste attività, svolte nel 2019, saranno utilizzati per ampliare la conoscenza sui vantaggi degli edifici verdi sia in termini energetici che ambientali. In relazione all'effetto dei sistemi verdi nei confronti della mitigazione di sostanze inquinanti come i composti organici volatili, è stato definito il protocollo per il monitoraggio e la valutazione di alcuni inquinanti d'interesse. Lo studio preliminare dei *tool* che forniscono i dati telerilevati e di quelli che per l'analisi delle immagini costituirà la base dell'attività correlata al telerilevamento delle annualità successive, per l'analisi dei valori termici nelle aree caratterizzate dalla presenza di superfici verdi. Si prevede di implementare l'analisi da scala edificio prototipo ENEA a scala distretto urbano (quartiere, aree urbane limitate, condomini, ecc.). Queste attività verranno realizzate a partire dalla successiva annualità (2020).

9 Bibliografia

- [1] «https://docs.google.com/viewerng/viewer?url=https://zinco-greenroof.co.uk/sites/default/files/2019-04/London_Living_Roofs_Walls_Report_2019.pdf,» [Online].
- [2] «https://static1.squarespace.com/static/58e3eef2994ca997dd56381/t/5d84dfc371cf0822bdf7dc29/1568989140101/Green_Roof_and_Wall_Policy_in_North_America.pdf,» [Online].
- [3] G. Pérez , L. Rincón , A. Vila , J. González e L. Cabeza, «Green vertical systems for buildings as passive systems for energy savings.,» *Appl Energy* (2011) 88(12): 4854–9.
- [4] M. Santamouris, N. Papanikolaou, I. Livada e I. Kora, «On the impact of urban climate on the energy consumption of buildings,» *Solar Energy, Volume 70, 3* (2001) 201-2016.
- [5] Ministero della Salute, «Linee di indirizzo per la prevenzione. Ondate di calore e inquinamento atmosferico.,» *Piano Nazionale di Prevenzione degli effetti del caldo sulla salute. Luglio 2019.*
- [6] A. Speak, J. Rothwell, S. Lindley e C. Smith, «Metal and nutrient dynamics on an aged intensive green roof,» *Environmental Pollution*, 184 (2014) 33-43.
- [7] U. Berardi, A. AmirHosein Ghaffarian e A. GhaffarianHoseini, «State-of-the-art analysis of the environmental benefits of green roofs,» *Applied Energy* 115 (2014) 411–428.
- [8] A. Cincinelli e T. Martellini , «Indoor Air Quality and Health,» *International Journal of Environmental Research and Public Health* (2017) 14, 1286.
- [9] A. Nagase e N. Dunnett, «Establishment of an annual meadow on extensive green roofs in the UK.,» *Landscape Urban Plan* (2013) 112:50–62.
- [10] R. Fioretti, A. Palla, L. Lanza e P. Principi, «Green roof energy and water related performance in the Mediterranean climate,» *Build Environ* (2010) 45:1890–904.
- [11] S. Brenneisen, «Spece for urban wildlife: designing green roofs as habitats nin switzerland,» *Urban habit* (2006) 4:27-36.
- [12] C. Campiotti, G. Giagnacovo, A. Latini e L. Nencini , «L’uso della vegetazione per aumentare l’efficienza energetica degli edifici e l’impiego di sistemi di climatizzazione rinnovabile,» *Analisi dati microclimatici per il quadrimestre1 settembre2018 – 31 dicembre 2018 Report RdS/PAR2017/XXX.*
- [13] C. Campiotti , A. Cancellara, L. Consorti, G. Giagnaco, F. Margiotta, L. Nencini, L. Pazzola e G. Puglisi, «L’uso della vegetazione per aumentare l’efficienza energetica degli edifici e l’impiego di sistemi di climatizzazione rinnovabile,» *Report RdS/PAR2017/084.*
- [14] R. Di Bonito, G. Guiagnacovo , D. Biagiotti e R. Colletta , «Eco-sistemi vegetali per l’efficienza energetica e il risparmio di energia,» *Report Ricerca di Sistema Elettrico, (settembre 2014) RdS/PAR2013/141.*
- [15] ISPRA, «Specie erbacee spontanee Mediterranee per la riqualificazione di ambienti antropici,» 86 (2013).
- [16] M. Simmons, B. Gardiner, S. Windhager e J. Tinsley, «Green roofs are not created equal: the hydrologic and thermal performance of six different extensive green roofs and reflective and non-reflective roofs in a sub-tropical climate.,» *Urban Ecosystems* 11 (2008):339-48.
- [17] C. Campiotti , G. Giagnacovo, A. Latini, F. Margiotta , L. Nencini, L. Pazzola e M. Scoccianti, «L’uso della vegetazione per aumentare l’efficienza energetica degli edifici e l’impiego di sistemi di climatizzazione rinnovabile: estensione dei risultati,» *Report RdS/PAR2018/055.*
- [18] G. Allen, L. Pereira, D. Raes e M. Smith, «Crop Evapotranspiration (guidelines for computing crop water requirements),» *FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56* (1998)..
- [19] S. Mugnai, «Elementi di ecofisiologia vegetale. In “Uso razionale delle risorse nel florovivaismo: l’acqua”,» A cura di Pardossi A, Incrocci L, Marzioletti P. Quaderno ARSIA N° 5. Agenzia Regionale per lo Sviluppo e l’Innovazione nel Settore Agricolo-Forestale. (2004) Firenze.

- [20] L. Incrocci , E. Resta e A. Pardossi, «Il Progetto IRRIGO: irrigazione sostenibile nel vivaismo ornamentale in contenitore.,» Misura 124 del Progetto Integrato di filiera “Pistoia: gli stilisti del vivaismo”, PSR 2007-2013 Regione Toscana..
- [21] ISPRA, «Verde Pensile: prestazioni di sistema e valore ecologico.,» Manuali e Linee Guida 78.3/2012. .
- [22] E. Giacomello, «Copertura a verde e risorsa idrica,» *FRANCOANGELI ed.(2012)*.
- [23] P. Abram , «Giardini pensili: Coperture a verde e gestione delle acque meteoriche,» *Sistemi Editoriali (2004)*.
- [24] P. A. Lanza G. Luca, «Il verde pensile nel clima mediterraneo. Genova 25 maggio 2007.».
- [25] C. Campiotti, C. Bibbiani, G. Alonzo e G. Giagnacovo, «Green roofs and facades agriculture (GRF) for supporting building energy efficiency,» *Journal of Sustainable Energy. Vol. II, No. 3, September, 2011..*
- [26] M. A. Gomarasca, «Elementi di geomatrica. Con elementi di: geodesia e cartografia, fotogrammetria, telerilevamento, informatica, sistemi di ripresa, sistemi di posizionamento.,» *ASITA*, 2004.
- [27] C. P. Bitelli G., «Utilizzo del dato satellitare termico in ambito urbano: un caso di studio.,» *Atti 14a Conferenza Nazionale ASITA -*, Brescia 9-12 novembre 2010:273-278..
- [28] AA.VV., «I dati satellitari free & open. Geoexperience issue 14: 8-9.».
- [29] C. Campiotti, L. Consorti, G. Giagnacovo e A. Latini, «Caratterizzazione di tipologie di sistemi vegetali per migliorare l’efficienza energetica degli edifici nella citta’ metropolitana,» *Report RdS/PAR2015/141..*
- [30] G. Pérez, J. Coma, I. Martorell e L. F. Cabeza, «Vertical Greenery Systems (VGS) for energy saving in buildings: A review.,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews 39 (2014) 139–165*.
- [31] «<https://landsat.gsfc.nasa.gov/>,» [Online].
- [32] «<http://glovis.usgs.gov/>,» [Online].
- [33] «<https://www.copernicus.eu/it>,» [Online].
- [34] «<https://asterweb.jpl.nasa.gov/>,» [Online].
- [35] «<https://terra.nasa.gov/about/terra-instruments/modis>,» [Online].
- [36] «<https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>,» [Online].
- [38] «L’uso della vegetazione per aumentare l’efficienza energetica degli edifici e l’impiego di sistemi di climatizzazione rinnovabile: estensione dei risultati».